Environment Canada Environnement Canada

CLIMATE [illegible] DIGEST

Projections for Canada's Climate Future

CCD 00-01
Special Edition

Environment Canada Environnement Canada

100-04935/

PROJECTIONS FOR CANADA'S CLIMATE FUTURE

A DISCUSSION OF RECENT SIMULATIONS WITH THE CANADIAN GLOBAL CLIMATE MODEL

BY

HENRY G. HENGEVELD

METEOROLOGICAL SERVICE OF CANADA
ENVIRONMENT CANADA

This document contributes to state of the environment reporting

This paper contains a minimum of 50% recycled fibres, including 10% post-consumer fibres.

INTRODUCTORY COMMENTS AND ACKNOWLEDGEMENTS

Projections for Canada's Climate Future was prepared to provide the Canadian climate impacts research community, policy makers and the general public with a summary of recent results from climate change experiments undertaken with the first version of the Canadian coupled climate model, to describe how they were achieved, and to discuss both their credibility and limitations. It is being published as the third of a series of 'special' Climate Change Digest reports aimed at explaining and assessing our current understanding (or lack thereof) of some of the more complex and controversial aspects of climate change science.

This report was prepared by Henry Hengeveld, Senior Science Advisor on Climate Change with the Science Assessment and Policy Integration Branch, Meteorological Service of Canada (MSC), and edited by David Francis of Lanark House Communications (Toronto).

The author wishes to acknowledge with appreciation the valuable input, through provision of data, review and/or critique, of the following colleagues within the MSC and elsewhere: George Boer, Greg Flato, Steve Lambert and Francis Zwiers (Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis-Victoria); Doug Whelpdale (Director, Climate Research Branch-Downsview); Rob Cross and John Stone (Policy and Corporate Affairs-Ottawa); and Daniel Caya (U de Quebec à Montreal). Patti Edwards (SAIB) also provided valuable assistance in preparing and finalizing many of the graphics, and in proof-reading the final text.

The French text of this report was translated by Marie-France Guéraud and colleagues of the Translation Bureau, Public Works and Government Services (Montreal) and reviewed by Guy Fenech (SAIB). Graphic design, artwork, and technical production was provided by BTT Communications (Toronto).

This report is available electronically at the SAIB website at **www.tor.ec.gc.ca/apac/.**
Additional hard copies may also be obtained, free of charge, by writing to:

Science Assessment and Integration Branch
Atmospheric and Climate Science Directorate
Meteorological Service of Canada
4905 Dufferin Street
Downsview, Ontario
M3H 5T4

(416) 739-4432

Published by Authority of the Minister of the Environment

© Minister of Public Works and Government Services Canada 2000

Catalogue No. En57-2000-01E
ISBN 0-662-64900-1
ISSN 0835-3980

TABLE OF CONTENTS

CLIMATE MODELS AND THE CLIMATE SYSTEM 1

THE CANADIAN COUPLED CLIMATE MODEL 3

CGCM1 PERFORMANCE EVALUATION 5

MODEL INTERCOMPARISONS 5

SIMULATIONS OF RECENT CLIMATE HISTORY 7

CGCM1 EXPERIMENTS FOR PROJECTING FUTURE CLIMATE CHANGE 10

CLIMATE PROJECTION RESULTS 11

PROJECTED GLOBAL TRENDS TO 2100 11

TRENDS IN NORTH AMERICA AND ADJACENT REGIONS 15

EXTREME EVENTS 19

FUTURE DIRECTIONS 23

CONCLUDING REMARKS 26

BOXES

SPINNING UP THE COUPLED CLIMATE MODEL 4

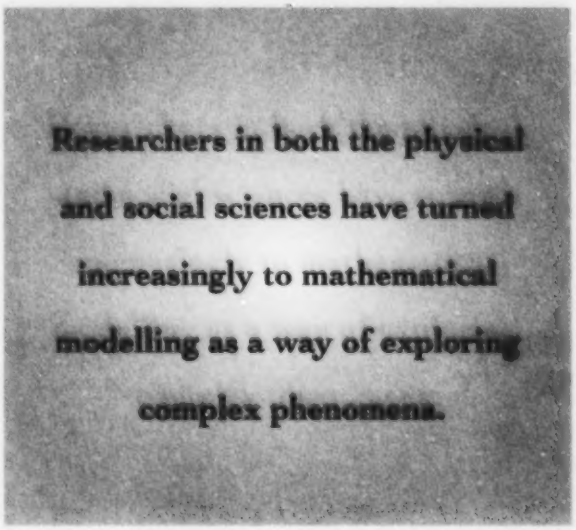
RECENT CAUSES FOR CLIMATE CHANGE 8

COMPARISONS WITH PROJECTIONS FROM OTHER CLIMATE MODELS 14

REGIONAL CLIMATE MODELS 25

CLIMATE MODELS AND THE CLIMATE SYSTEM

With the enormous growth in computer power that has occurred over the past two decades, researchers in both the physical and social sciences have turned increasingly to mathematical modelling as a way of exploring complex phenomena. Mathematical models link the various equations that describe the key relationships and processes within a system to simulate its behaviour. By changing the values of certain variables, scientists can study how the system responds to both external and internal changes. Because system processes can never be understood perfectly, models unavoidably simplify reality. Their results must thus be used with caution. However, models in many areas have now reached such a degree of reliability that they are used routinely for operational purposes as well as for research. At the present time, mathematical models are regularly used in such varied applications as the analysis of market behaviour, the preparation of weather forecasts, and the testing of nuclear weapons. In research they are especially useful for analyzing phenomena that cannot easily be studied within the laboratory or in the field.


Researchers in both the physical and social sciences have turned increasingly to mathematical modelling as a way of exploring complex phenomena.

These models are particularly important in climate change research. Indeed, our present understanding of the climate system and how it is likely to respond to increasing concentrations of greenhouse gases in the atmosphere would be impossible without the existence of what are known variously as global climate models or general circulation models – powerful computer programs that simulate the functioning of the global climate system in three spatial dimensions and in time. Given the scientific expertise needed to construct these models and the expensive computer resources needed to run them, it is not surprising that only a handful of countries are currently involved in advanced climate modelling.

Canada, which has been actively involved in climate modelling since the 1970s, is one of these countries. This work, which involves a close collaboration between scientists from Environment Canada and the universities, is now based at the Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis (CCCma) in Victoria, B.C. Over the years, Canadian climate modellers have made important contributions to our understanding of climate processes and climate change. As we enter a new century in which climate change could become one of humankind's greatest challenges, their work is becoming increasingly important as a basis for public understanding and decision making. This report will look at recent research activities at the CCCma and what they are revealing about the probable course of climate change over the next century. It includes a description of the CCCma's first coupled climate model and its capabilities, a review of the results and implications of recent climate change experiments, and a discussion of the reliability of these results. The CCCma experimental results will also be compared with those reported by other modelling groups. Finally, it will briefly review current and future developments in Canadian climate modelling research.

Present concerns about climate change arise from two basic and undisputed facts. The first is that greenhouse gases, such as carbon dioxide and methane, retard the rate at which the earth loses heat to space and thus contribute to the warming of the

earth's atmosphere. The second is that concentrations of these gases are increasing as a result of human activities.

This increase, which is already quite substantial and which will continue until greenhouse gas emissions are drastically reduced, is expected to lead to a warming of the planet's lower atmosphere and surface. We cannot be certain how much it will warm, however, nor can we immediately determine how other aspects of climate might be affected, because the earth's climate system is bewilderingly complex. It is the result not only of processes within the atmosphere itself but also of interactions involving the world's oceans, land surfaces, living things, and polar ice masses. A significant change in any one of these elements can trigger important changes in others. These in turn may cause a variety of feedback effects that further modify the original change, in some cases offsetting or moderating it, in others, enhancing it.

To determine the likely effect of a change such as an increase in greenhouse gas concentrations on the climate system, it is necessary to look at how the system as a whole responds. To do this, climate models are essential, because they integrate the main processes that occur within the climate system and calculate the adjustments and readjustments of its various elements as they respond to the original change.

The first models that could perform such tasks appeared in the late 1970s. They simulated the workings of the earth's atmosphere in three dimensions, representing the operation of climatic processes not only at the earth's surface but also at various levels above it. Because of the limited computer power available at the time, however, their simulation of the climate system was necessarily simplistic. Oceans, which play a major role in transporting heat from one part of the globe to another, were described in a highly simplified fashion, and their interactions with the atmosphere were represented only in a very generalized way. Clouds, whose effects on the heating of the atmosphere vary with their structure, altitude, and coverage of the sky (as well as with the time of day), were also poorly represented and could not respond to changes in other atmospheric conditions. The representation of the water cycle, which has important implications for clouds, precipitation, soil moisture, and greenhouse warming, was equally crude. In addition, early models suffered from coarse resolution; that is, they could only represent variations in the simulated climate variables at scales of about 800 km or greater. As a result, the precision with which they could represent many climatic processes was limited.

By the late 1980s, however, advances in modelling techniques, understanding of climatic processes, and computer power made possible the development of a second generation of GCMs. Although these models still used highly simplified oceans, their representation of interactions between the upper ocean and the atmosphere was much improved. In addition, spatial resolutions had been enhanced, the description of the water cycle had become more detailed, and sea ice and clouds now responded to changes in the model's climate. With these models, researchers were able to explore what they called equilibrium climate change, that is, the changes in climate that would result after the climate system had stabilized in response to a given change – usually a doubling – in greenhouse gas concentrations. These models gave valuable insights into the sensitivity of the climate system to higher concentrations of greenhouse gases, but they still could not satisfactorily simulate what is known as transient climate change, that is, the behaviour of the climate system while it is changing rather than after it has changed. The ability to model transient change is very important, because it provides a closer approximation to how we observe the climate system from year to year and decade to decade and hence allows a more rigorous test of how well the model approximates the historical behaviour of the real system.

To simulate transient climate change, models needed a much better representation of ocean processes and hence still more computer power. By the late 1980s and early 1990s various modelling groups had begun to meet these requirements, and a much more sophisticated third generation of climate models began to emerge. Known as coupled atmospheric-ocean general circulation models (AOGCMs) or, more simply, as coupled climate models, they include an atmospheric GCM that is fully coupled to a detailed three-dimensional model of the ocean. This feature, in combination with other refinements, gives them the ability to model climate much more realistically.

At the present time, there are more than 20 such models in use or under development around the world. The Canadian Centre for Climate

Modelling and Analysis completed the construction of its first coupled model, known as CGCM1, in the mid-1990s and has since run a series of transient climate change experiments with it. The results of these experiments have been made available to the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) data distribution centre for international use in research into climate change impacts. In 1999, the U.S. National Academy of Science also identified CGCM1 as one of the current leading performers in climate system simulation and recommended that its results be used in the U.S. National Climate Change Assessment.

THE CANADIAN COUPLED CLIMATE MODEL

CGCM1 provides a good illustration of both the advanced features and the continuing limitations of state-of-the-art climate models at the end of the twentieth century. It is made up of four key components:

1. An *atmospheric general circulation model*, known as GCMII, with 10 vertical levels and a horizontal resolution of approximately 3.7° of latitude and longitude (about 400 km). This resolution is similar to that used in most atmospheric GCMs, although some now achieve resolutions better than 300 km. Cloud cover and cloud characteristics respond interactively to other changes in the climate system.
2. An *ocean general circulation model* capable of reproducing the large-scale features of the ocean circulation as well as important water properties such as temperature and salinity. Known as the modular ocean model (MOM), it was originally developed by the Geophysical Fluid Dynamics Laboratory in Princeton, New Jersey, and has been modified for use in CGCM1. It has 29 vertical layers and a horizontal resolution of about 200 km, about twice that of the atmospheric model. Its resolution is still inadequate, however, to describe fully all of the many processes that control the behaviour of the oceans.
3. A *thermodynamic sea ice model* that allows ice to grow and melt in response to heat exchanges with the ocean and the atmosphere. Openings in the ice cover are represented by a relationship with the amount of ice present. This ice model was also used in earlier equilibrium experiments with CCCma's second-generation GCM.
4. A simple *land surface model* that calculates runoff and soil moisture on the basis of the balance between precipitation, surface evaporation, and the water holding capacity of the soil. The soil water holding capacity varies with location, depending on soil type and properties. While vegetation is not included directly in the model, some of its effects are approximated by specifying different soil depths and evapotranspiration rates at different locations.

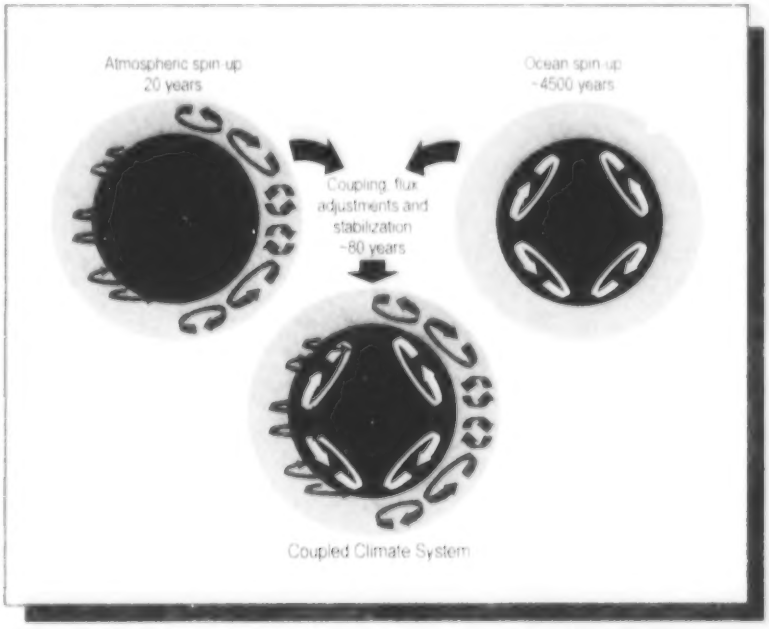
To operate the model, the ocean and atmospheric models are first individually "spun up" to an "equilibrium" condition equivalent to our present climate, and the components are then coupled together so that the atmosphere and ocean interact on a daily basis. However, errors in the modelled flow of heat and moisture between the ocean and atmosphere can cause the model to drift with time and produce unrealistic results. These errors are thought to be linked to omissions and inaccuracies in some of the models' approximations of ocean and atmospheric processes.

Modelling groups have resorted to two different ways of dealing with the drift problem. Some assume that the drift will remain the same throughout their climate change experiments and can thus be subtracted out of the results once the rate of drift has been determined in simulations of the present climate. Most groups, including the CCCma, though, attempt to eliminate the drift by making adjustments to the flow of heat and fresh water between the ocean and the atmosphere. These flux adjustments, as they are called, are then used in any experiment that the model runs. While both methods have their advantages and disadvantages, researchers cannot rule out the possibility that either of them could introduce unforeseen errors into experimental results. Researchers at CCCma and elsewhere have given a high priority to reducing and eventually eliminating the need for flux adjustments in future models.

Spinning up the Coupled Climate Model

General circulation models simulate the climate system using mathematical equations that describe the earth's radiation budget, its translation into heat and motion, and the operation of the water cycle. However, before they can be used for climate studies, these models must first be "spun up" to achieve an approximate state of equilibrium within the simulated climate system. For the atmosphere, this spin-up process can be completed within a few years of simulated time. However, the oceans, which respond much more slowly, require several thousand years of spin-up to reach a state of approximate equilibrium.

To save valuable computing time, the atmospheric and oceanic components of a coupled model are usually spun up separately before being connected, although some basic interactions between the atmosphere and the oceans must still be programmed into each component during the spin-up. In the case of CGCM1, the atmospheric component is first coupled to a non-circulating "slab" ocean system with sea surface temperatures that approximate actual observed values and then run until it approaches equilibrium. The atmospheric model is then run for a further 20 years so that researchers can calculate the average flux of energy and fresh water between the atmosphere and the ocean surface and estimate surface winds over the ocean. This information is then used in spinning up the ocean model, which is run for a simulated period of more than 4500 years to allow it to reach an equilibrium that is close to actual observed conditions. At this point, the two components are coupled together. However, because of the separate spin-up processes, there remain important differences between the atmospheric model's estimate of the amount of heat and moisture being transferred to and from the oceans and the ocean model's estimate of these transfers. If these fluxes don't balance, they can cause a large drift with time in the simulated climate. As a result, a flux adjustment, based initially on the differences in these values, is applied to the coupled system.



The two model components are then allowed to interact fully and to adapt to each other for a simulated period of a decade or so. Additional refinements are subsequently made to minimize any drift remaining in the coupled system. The system is then run for an additional 70 years to allow initial ripples in the system to fade away. Once it has stabilized, the model is run in this "control" mode for up to 1000 simulated years to produce statistical output useful for studying the natural variability of the model's climate. This information is also used in assessing the model's ability to approximate the real climate system, and as a reference against which to compare results from climate change experiments with the model.

CGCM1 PERFORMANCE EVALUATION

The need for flux adjustments is a reminder that models are simplified approximations of a very complex reality, and that their results must be interpreted with caution. That is why modelling groups put considerable effort into evaluating the reliability of their models. Such assessments not only indicate where the model's performance is acceptable and where it is weak but also help investigators interpret experimental results and refine the model's components.

The performance of a model can be evaluated in a variety of ways. One basic test is its ability to reproduce the principal characteristics of the present climate. Other important checks include the model's ability to simulate past climatic changes as well as its performance in relation to other climate models.

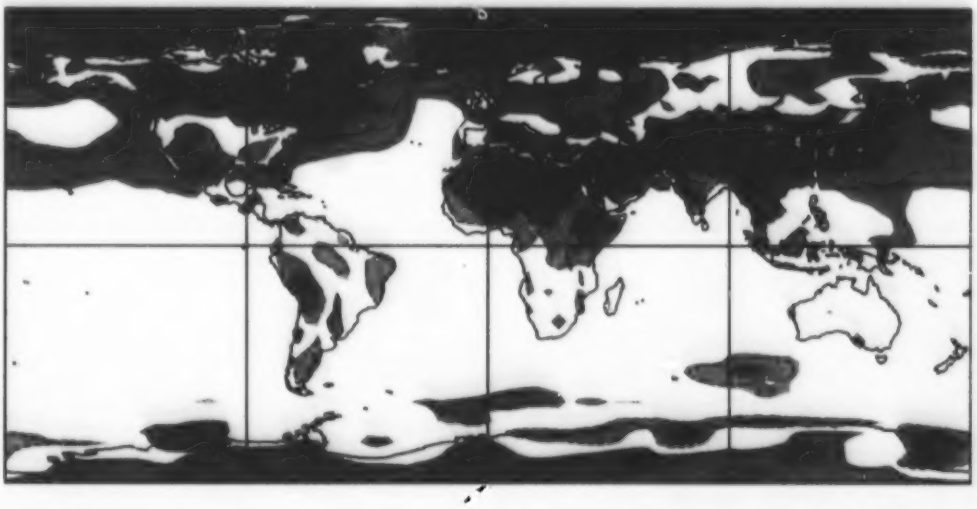
Model Intercomparisons

Model comparisons with observed climate and with results of other models are carried out within the World Climate Research Programme, primarily through the Atmospheric Model Intercomparison Project and the more recent Coupled Model Intercomparison Project. Results from these comparisons and other studies confirm that CGCM1 provides a generally realistic description of the global-scale features of the world's climate system. More specifically:

- The CGCM1 model climate is quite stable, with a very slow residual drift of 0.15°C per century (about ten times smaller than the temperature changes expected during the coming decades as a result of human impacts on the climate system).

Figure 1

Discrepancies in Modelled vs Observed Surface Temperature



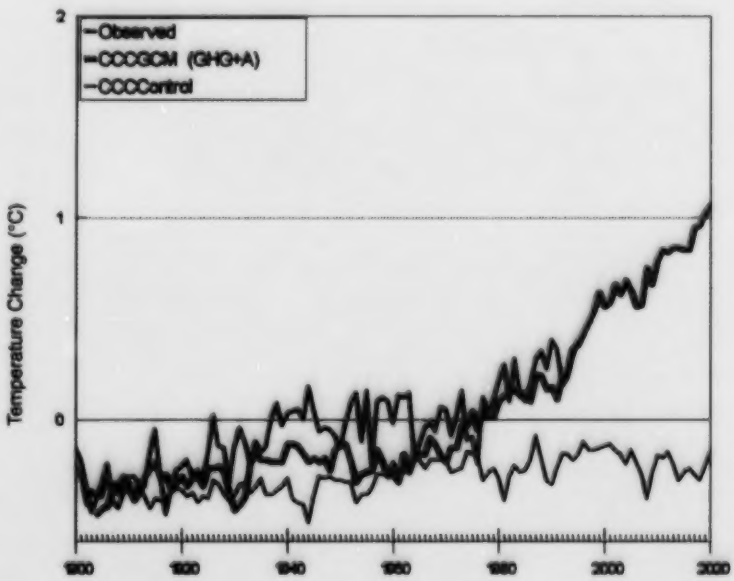
Source: Flato et al. (2000)

Differences between CGCM1 simulations and observations of surface temperature, shown here for the winter months of December, January, and February. In general the simulated temperature agrees quite well with observed conditions. There are, however, significant discrepancies over some land areas and over the Arctic Ocean.

- Mean global temperatures, sea level pressure patterns, and the atmospheric circulation are close to those observed in reality. Features similar to the Southern Oscillation (which plays a role in the El Niño phenomenon), the North Atlantic Oscillation (which is linked to periodic changes in European weather patterns), and other patterns of internal climate variability are also reproduced. In this respect, the model's performance is among the best of the coupled models tested under the inter-comparison programs. However, as Figure 1 shows, there are some notable discrepancies between the model's simulation of regional temperatures over land areas in winter and those observed. These are most pronounced in mountainous regions and over the Arctic Ocean. In addition, while CGCM1 captures the year-to-year variability of temperatures over land quite well, it underestimates such variability over some ocean areas, such as the tropical Pacific.
- Global precipitation patterns also appear to be reproduced realistically, although these are more difficult to evaluate than temperature and pressure.
- Ocean circulation, heat transport, and salinity patterns are generally within the range of observation-based estimates. Some discrepancies between simulated and observed patterns occur in polar regions.
- Ice extent is approximated reasonably well in the Antarctic but underestimated in both summer and winter in the Arctic. Global snow cover agrees well with observations, particularly in winter, although it is overestimated in some regions

FIGURE 2

PROJECTED AND OBSERVED 20TH CENTURY TEMPERATURE TRENDS



Sources: Flato et al. (2000); NOAA

Trends and variations in average global surface temperatures as simulated in the CGCM1 control run (blue line) and one of the GHG + aerosol runs (red line), compared with observed climate trends (black line).

(e.g., the Mongolian Plateau) and underestimated in others (e.g., western Europe). Some of these discrepancies may be due to poor observational data rather than model deficiencies.

Simulations of Recent Climate History

CGCM1 has also been tested to see if it can realistically simulate changes in the world's climate over the past century. To do so, a series of experiments was run with the model. The first of these was a control run in which greenhouse gas concentrations and other external forces of change were held constant. The purpose of this experiment was to provide a reference or baseline against which the results of the other experiments could be compared. A second experiment (GHG) considered only increases in greenhouse gas concentrations, converted to an equivalent or "effective" concentration of carbon dioxide. Finally, a set of three experiments (GHG+A) looked at the effects of greenhouse gases and an additional factor, the direct effect of sulphate aerosols. These are tiny airborne particles that, like greenhouse gases, are largely byproducts of the burning of fossil fuels. Unlike greenhouse gases, however, they have a cooling effect on surface temperatures because they reflect incoming sunlight back to space. Sulphate aerosols differ from greenhouse gases as well in being relatively short-lived. They are thus concentrated downwind of the areas in which they form (mostly eastern North America and Eurasia), and their effects consequently tend to be more localized than those of greenhouse gases, which have much longer atmospheric lifetimes and are more evenly distributed around the world.

Each of the greenhouse gas plus aerosol experiments began with slightly different initial conditions in order to introduce an approximation of natural variability and noise within the climate system into the experiments. Changes in the concentration and distribution of sulphate aerosols were based on independent estimates compiled by aerosol experts using chemical models. Both the greenhouse gas and aerosol scenarios used in these experiments were similar to those used by other modelling groups.

The model did not take account of the indirect effects of sulphate aerosols on cloud properties, and hence climate, since these are still not adequately understood. For much the same reason, the effects of variations in the intensity of the sun, stratospheric ozone depletion, and changes in concentrations of non-sulphate aerosols were also excluded, although these have undoubtedly had some influence on climate over the past century (see box on *Possible Causes of Recent Climate Change*).

When the experiments were carried out, the simulation with greenhouse gases only overestimated the amount of temperature change, showing a global increase of 0.8°C since 1900, somewhat higher than that observed. The spatial pattern of the increase also did not show some of the areas of surface cooling evident in climate observations.

The three experiments that included both greenhouse gases and aerosols, however, reproduced the climatic changes of the past century with a respectable degree of realism. As shown in Figure 2, the modelled increase in the average global temperature of 0.6°C is consistent with the best estimates derived from climate records, although the model tended to underestimate average global temperatures in the middle of the twentieth century, perhaps because of natural variability or changes in climate forcings not accounted for by the model.

In addition, the major patterns of climate change as shown by the model experiments were qualitatively similar to those observed. The greatest warming in the central and northern areas of the Northern Hemisphere occurred in winter, while pockets of cooling formed over parts of the oceans and, in summer, over localized areas of the continents. The greatest warming in the Southern Hemisphere occurred over the mid-latitude oceans. The patterns of change differ in detail between the three experiments. These not only provide a realistic indication of the model's ability to simulate the variability of the natural climate but also show how such random fluctuations can make the effects of greenhouse gases and aerosols harder to detect.

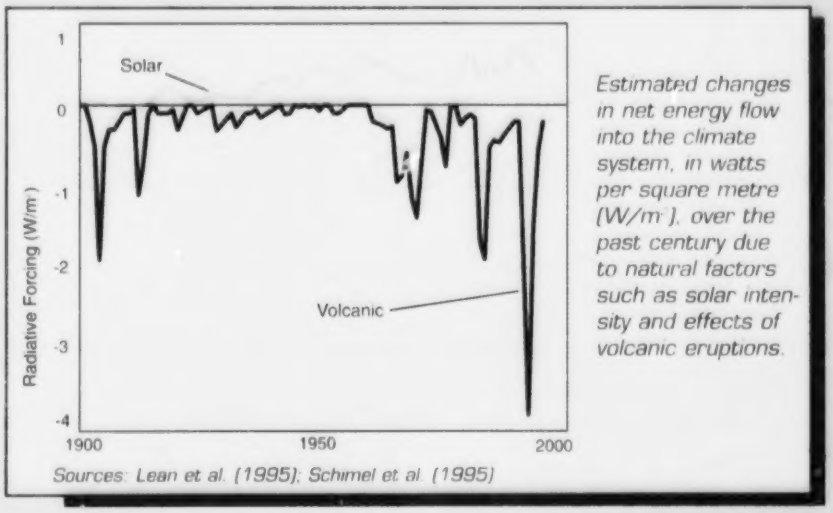
These results indicate that the internal processes of CGCM1 are operating realistically.

Recent Causes for Climate Change

During the past century, several processes external to the climate system are believed to have influenced trends in global climate. As illustrated in the figures below, these include:

- ***Changes in solar intensity.*** *The output of energy from the sun varies slightly from decade to decade, and there is also evidence that solar intensity has increased somewhat over the past 3 centuries. The causes for these decadal fluctuations and the longer-term trend are not well understood, and there is considerable uncertainty about the magnitude of these changes, but they may have some important effects on our climate. Best estimates suggest that these changes have increased the amount of energy flowing into the lower atmosphere by about 0.2 watts per square metre over the past century. Some experts suggest that the trend towards increased solar intensity may reverse during the next century.*

- ***Changes in concentrations of stratospheric aerosols.*** *Large quantities of aerosols (i.e., liquid and solid particles) can be injected directly into the stratosphere by explosive volcanic eruptions such as that of Mt. Pinatubo in 1991. These aerosols, which are predominantly composed of sulphates, are highly effective reflectors of incoming sunlight, and, during peak concentrations following such eruptions, can cause a net surface cooling of up to 0.5°C. This cooling effect is episodic, however, as the aerosols settle out of the atmosphere over a period of three to five years, and it can only be sustained if several large explosive eruptions occur in close succession. During the period between 1920 and 1960, concentrations of sulphate aerosols in the stratosphere due to such eruptions were below average, thus allowing more sunlight to reach the earth's surface. This may have contributed to some surface warming during the period, although the effect is believed to be small.*



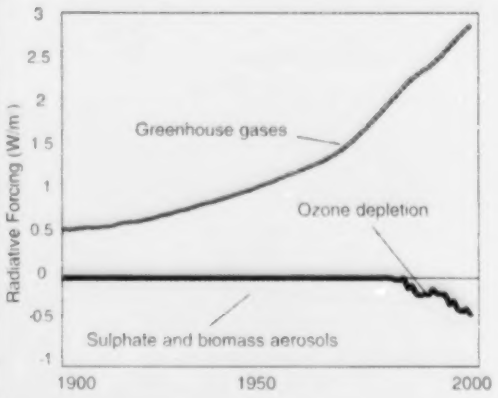
Sources: Lean et al. (1995); Schimel et al. (1995)

Estimated changes in net energy flow into the climate system, in watts per square metre (W/m^2), over the past century due to natural factors such as solar intensity and effects of volcanic eruptions.

- ***Increases in concentrations of greenhouse gases.*** *Atmospheric concentrations of long-lived, and hence well-mixed, greenhouse gases have increased substantially in all areas of the world. Carbon dioxide concentrations, for example, have increased by 30% over pre-industrial levels, methane by 145%, and nitrous oxide by 15%. Concentrations of other trace gases, some created entirely by human activities, have also increased. The increased forcing from these gases during the past century amounts to about 2.5 watts per square metre. Further increases in concentrations of these gases over the next century could add an additional 2 to 8 watts per square metre.*

- ***Increases in concentrations of tropospheric aerosols.*** *Concentrations of these aerosols, including sulphate aerosols, soot, mineral dust, and particles from burning biomass, have increased substantially over the past century as the result of human activities. Because they remain in the atmosphere for relatively short periods of time, their concentrations are highest near their sources, decrease rapidly with distance from the source, and decline quickly as sources are eliminated. Most of the increase in concentrations has occurred during the past 50 years, near and down-wind of industrialized*

regions and hence primarily in the Northern Hemisphere. Their climatic effects are complex and as yet poorly understood. The direct effects of past increases in sulphate aerosols (believed to be the most dominant) through reflection of incoming sunlight are estimated to have reduced solar energy absorbed within the lower atmosphere and at the surface by somewhere between 0 and 1.5 watts per square metre. Indirect cooling effects due to changed cloud properties induced by these aerosols are as yet very difficult to estimate, but could be even larger. In future decades, this cooling influence is expected to initially increase as emissions in developing countries rise, although emissions would be slowed and perhaps reversed if emission controls were to be implemented in these countries.

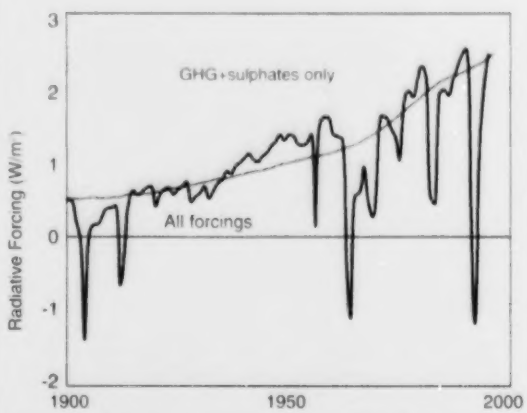


Estimated changes in net energy flow into the climate system during the past century due to human influences, including well-mixed greenhouse gases (solid red), stratospheric ozone depletion (dark blue), and sulphate and biomass aerosols (light blue).

Sources: Shine et al. (1990); Schimel et al. (1995); Hansen et al. (1997)

- **Thinning of the ozone layer.** The thinning of the stratospheric ozone layer during the past two decades has also reduced the net amount of heat energy retained by the climate system by an estimated 0.2 watts per square metre. Studies with atmospheric chemistry and climate models suggest that ozone depletion will continue to have some influence on climate for the next few decades. This influence will diminish gradually if the ozone layer recovers as expected in response to the phasing out of ozone-depleting substances under the Montreal Protocol.

Each of the above forces of change has a unique effect, in time and space, on the climate system. This is because each evolves in a different way, and each has a distinct effect on the flow of energy through the climate system. Changes in solar intensity and in concentrations of greenhouse gases, for example, have a global effect, whereas changes in aerosol and stratospheric ozone concentrations are more regionalized. While much remains to be known about their various influences on climate, the net effect of all these forces appears to be broadly similar in magnitude to the combined influence of greenhouse gases and the direct effect of sulphate aerosols.



Comparison of net radiative forcing due to past changes in greenhouse gas and aerosol concentrations (orange line) with that estimated if other forcing factors such as solar irradiation, ozone depletion and non-sulphate aerosols are added.

Sources: Shine et al. (1990); Lean et al. (1995); Schimel et al. (1995); Hansen et al. (1997)

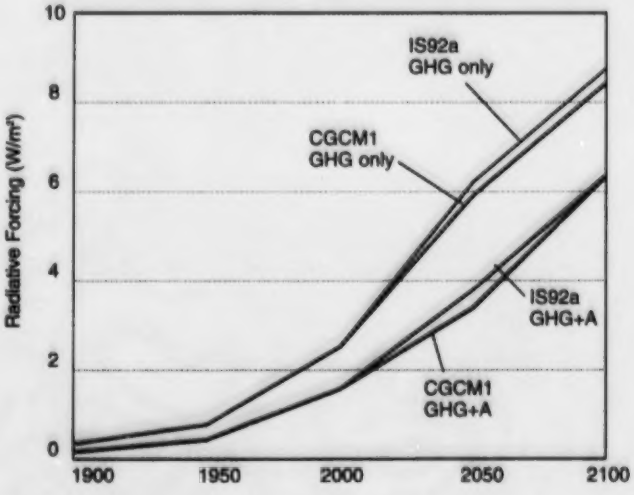
CGCM1 EXPERIMENTS FOR PROJECTING FUTURE CLIMATE CHANGE

Once the credibility of a model has been established through realistic simulations of past and present climates and intercomparisons with other models, it can be used with some confidence to explore future climate change. For their study of climate change in the twenty-first century, modellers at CCCma continued the control run, the GHG simulation and the three GHG+A climate change experiments beyond 1990 to the end of year 2100. The control run provided a basis for assessing model drift and natural variability and a reference against which the results of other experiments could be compared. By continuing the "historical" experiment (rather than beginning with a "cold" start), the simulations for climate change in the 21st century were given a running start (also referred to as a "warm" start) that ensured that climatic changes that had already begun in the 20th century and that were still evolving would be incorporated into the future climate change projections. It also ensured that the effects of the original differences in the starting conditions of the historical experiments would be continued into the 1990–2100 experiments and thus provide an indication of the degree of natural climate variability in the three responses to changes in greenhouse gases and aerosols.

From 1990 on, combined greenhouse gas concentrations used in the four climate change experiments were increased at a rate of 1% compounded per year. This leads to the equivalent of a doubling of 1980 concentrations of carbon dioxide (or a tripling of

FIGURE 3

COMPARING RADIATIVE FORCING SCENARIOS



Sources: IPCC (1992); IPCC (1995); Boer et al. (2000)

Comparison of the global mean radiative forcing, in watts per square metre, used for the four CGCM1 climate change experiments with that estimated for the IPCC IS92a forcing scenario used by some other modelling groups. The proximity of the lines indicates that these scenarios are very similar.

pre-industrial concentrations) by 2050. By 2100, the model's greenhouse gas concentrations are equivalent to three times the 1980 concentration of carbon dioxide and four times the pre-industrial value.

Although several other modelling groups also use the 1% compounded scenario for increases in greenhouse gases, some groups use an alternative scenario published by the Intergovernmental Panel on Climate Change in 1992. Known as IS92a, this scenario forecasts increases in greenhouse gas emissions over the next century on the basis of estimated changes in energy demand, population growth, and other factors. As shown in Figure 3, the increased energy made available to the climate system (or the "global mean forcing") is very similar for the two scenarios.

In the three "GHG+A" experiments, it was assumed that the direct effects of sulphate aerosols on the climate system for the 1990–2100 period would change little in the currently industrialized regions of the world. However, substantial increases were included for developing regions, particularly Mexico, the Middle East, Southeast Asia, and regions of South America and Africa. Aerosol concentrations in these regions peak by 2050 and then begin to decline slightly thereafter.

A number of other factors, such as changes in the intensity of the sun's radiation and the thinning of the ozone layer, may also affect the course of future climate change. Because of uncertainties about their impacts on climate, these factors were not included in the experiments. The contribution of these factors to future climate change is believed to be much less important than that of greenhouse gases or sulphate aerosols (see box on *Recent Causes of Climate Change*), but the omission of these factors from the experiments may have made the model's portrayal of decade-to-decade changes in climate somewhat less realistic.

CLIMATE PROJECTION RESULTS

The results of the climate change experiments with the CGCM1 described in the preceding section reveal a great deal about the probable direction, magnitude, and large-scale pattern of climate change in the twenty-first century. They tell us not only about projected changes in average global temperature and precipitation but also about potential changes in ocean circulation patterns, sea level, sea ice, and climate extremes as well as possible trends in regional, seasonal, and even daily patterns of climate behaviour.

Before looking at these results in detail, however, we should remember that they are only part of an ongoing process of refining our knowledge of climate change. While they do provide valuable insights into future climates, they are by no means definitive. They must be interpreted in the light of what is known about the model's strengths and limitations, the results of similar experiments with other models, and our overall understanding of the climate system. They provide a way of checking and refining our current assessments and best estimates of climate change, such as those published by the Intergovernmental Panel on Climate Change, and they also contribute to the development of new estimates based on improved simulations. These, in turn, will be modified over time as the results of future experiments with still more sophisticated models become available.

Projected Global Trends to 2100

The following discussion of the CGCM1 projections of climate change over the next century is based on the results of the three GHG + aerosol runs (the more realistic of the scenarios used), unless otherwise noted. Because climate can fluctuate considerably from year to year as a result of internal climate system variability, the model projections are calculated as changes between the average conditions over a given 20-year period against those over another 20 year reference period. For convenience, these time periods are referred to in this report by their central year. Thus, projections for "2010" actually describe average conditions for the period from 2000 to 2020, and "2050" those for the period from 2040 to 2060. Likewise, the 1975 to 1995 reference period is denoted as "1985".

Temperature. All three GHG+A runs show very similar trends in average global surface temperatures. These increase by about 0.5°C above 1985 levels by 2010, and by about 1°C by 2025. By 2050, the difference increases to 1.7°C above 1985 levels, rising to about 3°C by 2075 and nearly 4.5°C by 2100. Neglecting the cooling effects of aerosols gives even higher increases, with average global surface temperatures in the GHG only simulation rising 2.4°C by 2050 and nearly 5.5°C by the end of the century. The control run, in contrast, shows temperatures remaining within a range of a few tenths of a degree of pre-industrial values.

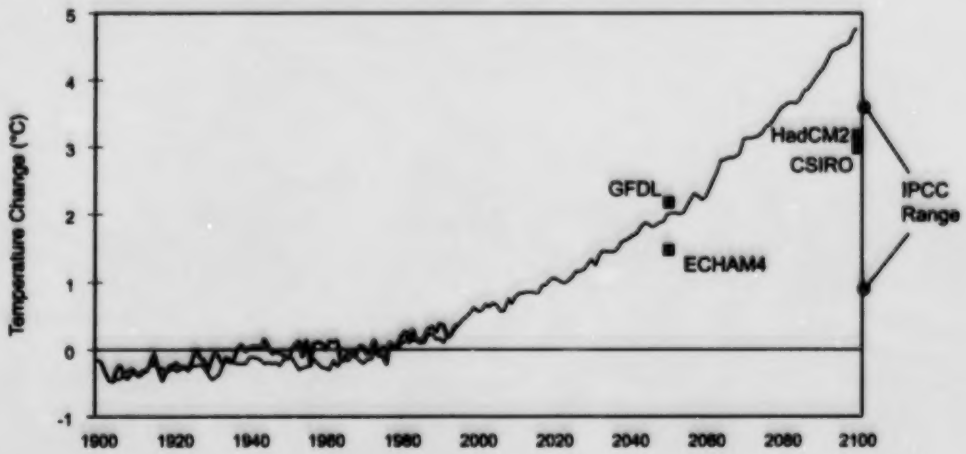
Looking beyond the global averages, one can expect temperatures to rise faster over land than over the oceans. In the three GHG+A experiments, temperatures over land masses rise, on average, by 2.5°C by 2050, while ocean temperatures warm by 1.5°C. By 2100, however, the spread between land and ocean temperatures increases, with land surfaces warming by 6°C and oceans by 3.5°C.

When the Intergovernmental Panel on Climate Change completed its second assessment of climate change for the United Nations in 1995, it estimated that the probable range of increase in the earth's average surface temperature over the next century would lie somewhere between 1°C and 3.5°C, if the effects of both greenhouse gases and sulphate aerosols were taken into account. As Figure 4 shows, CGCM1's three GHG + A simulations remain close to the upper limit of these estimates until about 2060, as do the results of similar experiments with four other advanced models. After that, however, the projections of the various models begin to diverge as a result of differences in model characteristics. CGCM1 shows more warming by 2100 than either the IPCC estimates or the two other models whose experiments extend that far, but the projections for all three models appear to be well above the mid-point of the IPCC range.

If these model projections are correct, then average global temperatures can be expected to approach and possibly exceed levels that have not been seen

FIGURE 4

PROJECTED CHANGES IN GLOBAL SURFACE TEMPERATURE

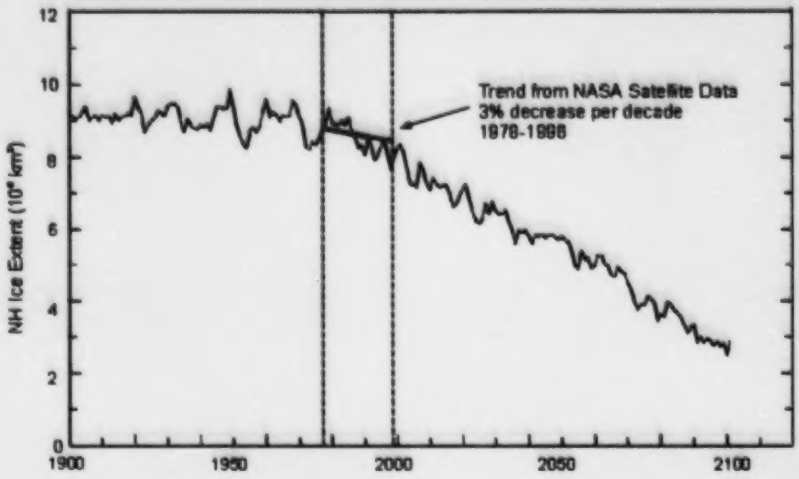


Source: Boer et al. (2000); IPCC Data Distribution Centre

The CGCM1 simulation (red line) projects a warming relative to the 1951–80 temperatures of more than 4°C by 2100. Results from other modelling experiments for the 2050 and 2100 time periods (blue squares), as well as observed trends and the range of expected warming in 2100 projected by IPCC in 1995 (black dots), are also shown for comparison.

FIGURE 5

PROJECTED CHANGES IN ARCTIC SEA ICE COVER



Source: G. Flato

CGCM1 projects that sea ice cover in the Arctic will decrease dramatically by 2100. Recent trends as measured by satellite are shown for comparison.

since the warm interglacial period that preceded our last great ice age, some 125,000 years ago. The rate at which this change will occur is also notable. The transition between the peak of the last ice age about 25,000 years ago and the start of our present interglacial about 10,000 years ago involved a global temperature increase of 4–8°C spread across several millennia. While projections for temperature increases over the next century are of almost the same order, the period in which they occur will be dramatically shorter.

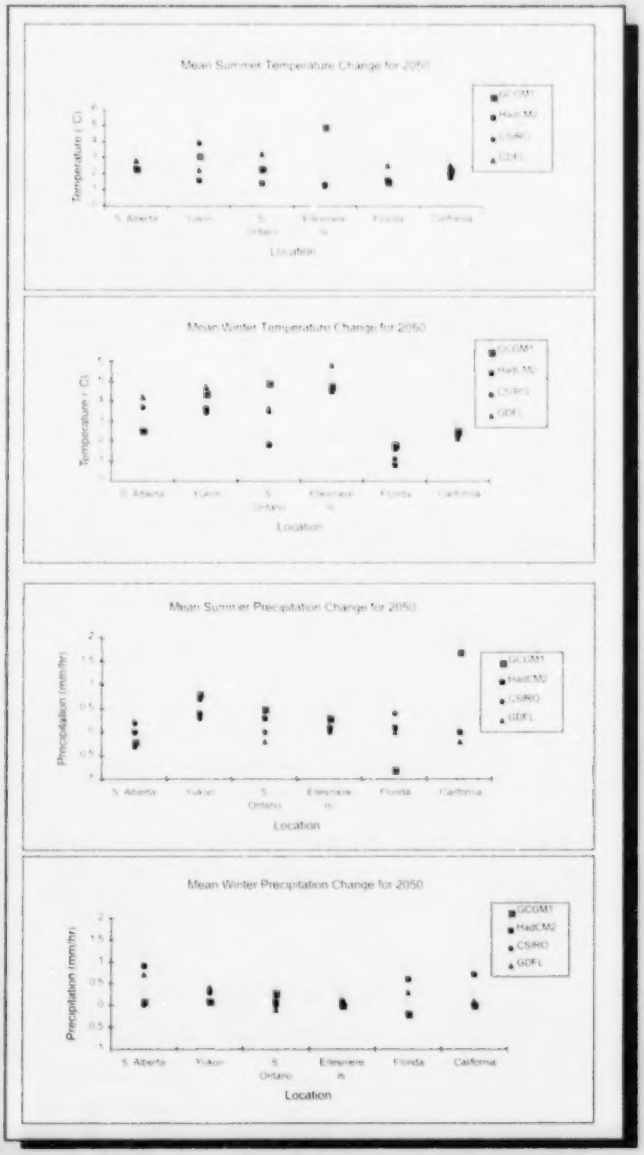
Precipitation. When temperatures rise, evaporation from surface waters also becomes greater and the water cycle becomes more active. As a result, average global precipitation can be expected to increase as well. The CGCM1 experiments project an increase of about 1% by 2050 for the GHG+A runs and more than 2% for the GHG only scenario. By 2100 these estimates rise to 4.5% and 7% respectively. These increases occur primarily over the oceans (where surface moisture is readily available) and over land masses in the higher latitudes of the Northern Hemisphere. Elsewhere, average precipitation over land changes little or decreases. Because of increased temperature and evaporation, almost all land areas experience a decrease in average soil moisture, particularly in summer. The type of precipitation over the Northern Hemisphere also changes as the climate warms. The snow season becomes significantly shorter, and the area covered by snow decreases by more than 30% in winter.

Sea Ice. CGCM1 projects major changes in sea ice coverage in the Northern Hemisphere, with annual mean coverage decreasing by about 40% by 2050 and virtually disappearing by 2100 (Figure 5). The resulting increase in the amount of open water and the duration of the open water season in the High Arctic has important implications for the regional climate, since open water allows more moisture to escape into the atmosphere above it and absorbs more incoming sunlight. This, in turn, increases regional precipitation, particularly in winter, and allows more heat to escape from the ocean into the atmosphere. Changes in ice conditions in the Southern Hemisphere, in contrast, are much less dramatic, mainly because of a more modest warming in waters surrounding Antarctica.

Comparisons with Projections from Other Climate Models

Several other climate models have been used to conduct experiments similar to the one described here. All show significant warming during the twenty-first century in response to increasing concentrations of greenhouse gases and changing concentrations of aerosols, with temperature increases for the century in the upper half of or above the 1–3.5°C range estimated by the Intergovernmental Panel on Climate Change in 1995. Using similar forcing scenarios, the UK Hadley Centre, the American GFDL, the German MPI, and the Australian CSIRO modelling groups project temperature increases of between 1.4° and 2.2°C for the 2040–2060 period, or an average of 1.8°C for all four models. In comparison, CGCM1's projection for the same period is about 2°C. Other coupled models, in general, show continental-scale characteristics similar to those of CGCM1 as well as a comparable pattern of enhanced land mass warming relative to the oceans.

At the regional and local levels, however, some important differences can emerge. Such differences underscore the lack of confidence in the details of model simulations at such scales. The following illustrations provide some comparisons between CGCM1's projections for temperature and precipitation changes between 2040 and 2060 and those of three other models for six relatively small areas within North America – Ellesmere Island, the northern Yukon, the central Prairies, southern Ontario, Florida, and southern California. All show considerable warming, but the range between results is also substantial for most locations. All of them also show modest changes in summer precipitation for the four Canadian sites, but CGCM1 shows more dramatic changes for the two American sites. Similarly, all show increased precipitation at the two Arctic sites but disagree on the direction of summer rainfall changes in southern Canada. All four models show winter precipitation changing little or increasing at all six locations. These results are a reminder that regional and local results must still be used with caution, particularly for precipitation. For that reason it is important to have results available from a number of advanced models when assessing the social and ecological implications of climate change.



Ocean Circulation. In the North Atlantic and off the coast of Antarctica, the surface sea water becomes very cold and salty, and its density causes it to sink rapidly from the ocean surface to the ocean floor at certain locations. This process, known as deep water formation, plays an important role in the planet's climate because it produces an overturning "thermohaline" circulation that causes the sinking cold water to flow southward in the deep ocean and warmer surface water containing vast quantities of heat to flow towards these higher latitude regions to replace the sinking water. Much of the heat from this water is transferred to the atmosphere.

Simulations with CGCM1, as well as with other models, predict a slowing down of this overturning circulation during the 21st century. This is because the models project that a higher flow of fresh water into the North Atlantic from increased high latitude precipitation will reduce the salinity of the surface water and cause an estimated 50% decrease in the rate of deep water formation by 2100. That, in turn, would cause a major decrease in the movement of warm tropical waters into the North Atlantic, thus offsetting some of the expected atmospheric warming in this region. Small areas within the northwestern Atlantic, as well as in the Southern Ocean, are actually projected to become slightly cooler than they are now.

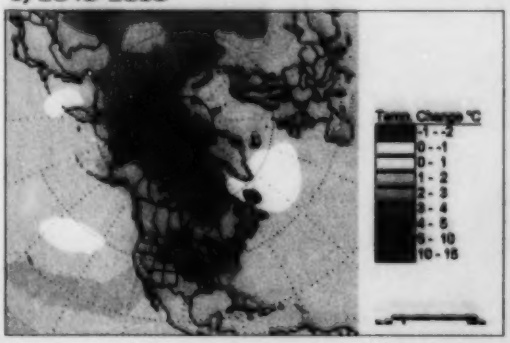
Trends in North America and Adjacent Regions

While global averages and patterns give a useful indication of the expected magnitude and general characteristics of climate change, it is at the local and regional levels that climate change will be experienced and responded to. Regional changes, though, could be quite different from the global averages. Consequently, there is considerable interest in what the models have to say about climate change at the regional level. Regional climate projections, however, are generally less reliable than global projections and should be treated with greater caution. Model intercomparisons are especially important at this level as a way of estimating the degree of uncertainty in the results.

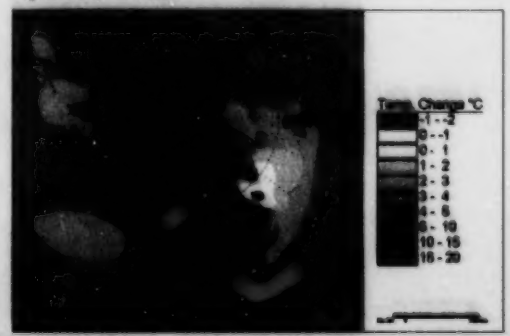
Figure 6
Projected Changes in Annual Temperature

a) 2010–2030

b) 2040–2060



c) 2080–2100



Source: CCCma

CGCM1 projections of Northern Hemispheric annual temperature change relative to mean values for 1975–1995 for (a) 2010–2030, (b) 2040–2060, and (c) 2080–2100.

Temperature. Because land masses warm faster than oceans, warming over the North American continent can be expected to be greater than the global average. For most of the central and southern parts of continental North America, for example, the model shows average temperatures rising by 1–2°C by 2020 and increasing to 2–4°C by 2050 and 5–10°C by 2090 (Figure 6). The amount of warming is broadly similar in both winter and summer. Coastal areas and the low latitudes of central America warm more slowly, but also reach temperature increases of 3–5°C by 2090. The greatest warming, however, occurs over the High Arctic, where average annual temperatures increase by as much as 3–4°C by 2020, 5–10°C by 2050, and more than 15°C in some sectors by 2090.

Winter changes in the Arctic are even more dramatic, with average temperatures rising considerably more than 20°C above the current average by 2090 (Figure 7). Of course, since present winter temperatures in the Arctic can extend well below –40°C, Arctic winters would still be cold, but the model's results imply that they would be much less extreme. Summer temperatures on the other hand do not warm as much because of the moderating effect of the cold waters of the Arctic Ocean.

Two factors are particularly important in shaping temperature change in the Arctic. First, the retreat of snow cover on land and ice cover on the oceans changes the Arctic surface from one that is highly reflective of incoming solar energy to one that is more absorbent. The greater amount of solar energy absorbed at the surface adds to the warming that has already taken place. This effect is particularly important in spring and fall throughout the Arctic and in summer as well in the most northerly regions. The second factor is that, as the climate warms, the ice on Arctic waters forms later in the fall, disappears earlier in the spring, and becomes thinner in winter. Consequently, its role as an insulating barrier between the cold winter air above and the warmer ocean waters below decreases. This allows much more of the ocean's heat to escape into the Arctic air during the cold seasons and warms the air considerably. The reverse, of course, is true in summer, when the ocean warms much more slowly than the air and thus reduces the rate of atmospheric warming.

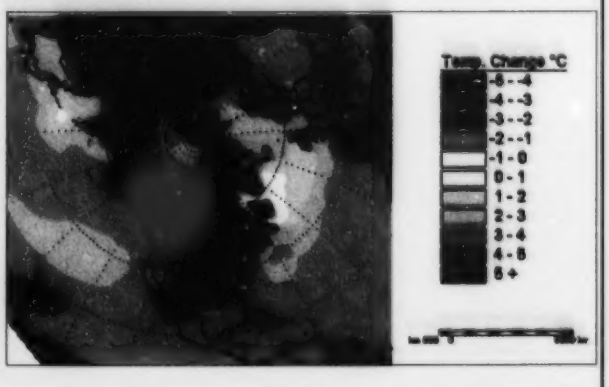
Temperature trends over the northern Asian land mass are broadly similar to those over North America, with warming over the continental interior reaching

FIGURE 7

PROJECTED CHANGES IN SEASONAL TEMPERATURE

a) winter

b) summer



Source: CCCma

CGCM1 projections of Northern Hemispheric seasonal temperature change for 2080–2100 relative to 1975–1995 for (a) winter and (b) summer.

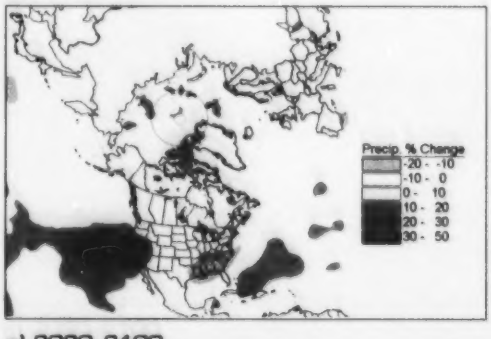
5–10°C by 2090. Here, however, the pattern of greatly enhanced winter warming that was seen over the polar regions of North America extends further south into the mid-latitudes. Europe, on the other hand, warms less than either northern Asia or North America. A weaker snow reflectivity feedback could be a factor, since Europe currently also has less snow extent in winter. However, another significant influence may be the slowing down of the northward heat transport in the North Atlantic. Currently, warm tropical ocean waters brought northeastwards by this system release enough heat to the air to keep temperatures over much of Europe some 10°C warmer than land areas at similar latitudes in other parts of the Northern Hemisphere. With the 50% reduction in the rate of deep water formation projected by the model, the movement of warm water into the North Atlantic will also be slowed and the warming effect on northern Europe will be diminished, thus offsetting some of the effects of global warming. Because of these factors, CGCM1 projects that average temperatures in northern and central Europe will warm by only a few degrees by 2050 and by about 3–5°C by 2090. Warming in southern Europe, where the effects of the Atlantic circulation are minimal, will be similar to that in North America.

In contrast to the amplified polar warming shown by the model for Northern Hemisphere land masses and the Arctic Ocean, the North Pacific and North Atlantic Oceans warm more in the tropics and less in the middle to high latitudes. This appears to be linked to weaker ocean heat transport from the tropics to the higher latitudes as the ocean circulation system slows. Consequently, air temperatures over the tropical regions of both oceans, though warming more slowly than those over land areas, increase by 1–3°C by 2050 and by 3–5°C by 2090. In the mid-latitudes, on the other hand, warming in the North Pacific and much of the North Atlantic is limited to 2–4°C by 2090, with areas in the Labrador Sea and south of Greenland showing no significant change and a small region east of Labrador actually showing slight cooling, particularly in summer.

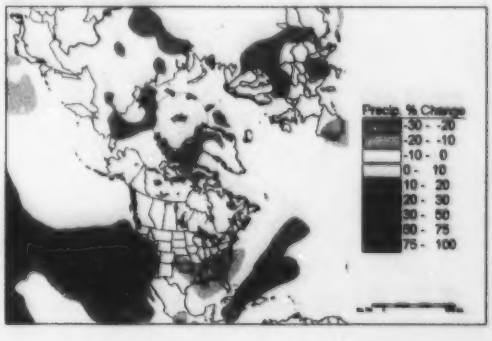
FIGURE 8

PROJECTED CHANGES IN ANNUAL PRECIPITATION

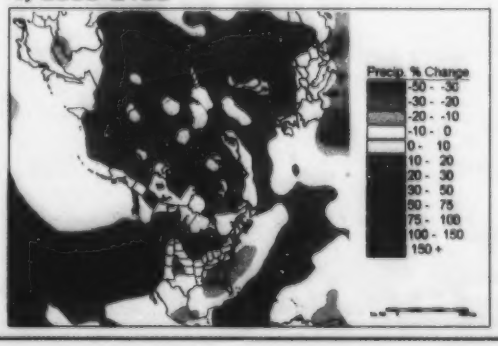
a) 2010–2030



b) 2040–2060



c) 2080–2100

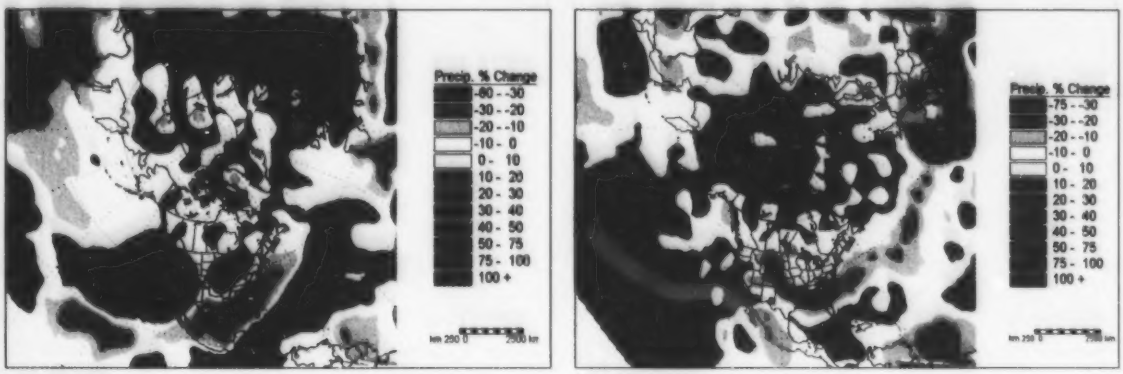


Source: CCCma

CGCM1 projections for changes in precipitation relative to 1975–1995 averages for (a) 2010–2030, (b) 2040–2060, and (c) 2080–2100.

FIGURE 9

PROJECTED CHANGES IN SEASONAL PRECIPITATION



a) winter *b) summer*

Source: CCCma

CGCM1 projections for changes in seasonal precipitation by 2080–2100 relative to the averages for 1975–1995 for (a) winter and (b) summer.

Precipitation and Hydrological Changes. Although the CGCM1 model indicates an increase in average global precipitation over the next century, there is considerable variation from region to region. In the tropical Pacific, the model shows an El Niño-like trend, with decreased precipitation in the western Pacific but substantial increases in the east extending over much of the western United States. These simulations suggest that annual rainfall averages over most of California, for example, could increase by 30–50% over present levels by 2020, by up to 100% by 2050, and by more than 150% by 2090 (Figure 8). These changes are more pronounced in winter than in summer (Figure 9). In contrast, much of central and southern North America could see significant decreases in annual precipitation by 2090, particularly in the southeast, where decreases of up to 30% are projected. These decreases are greater in winter than in summer. Southern Europe could also experience decreases in excess of 30%.

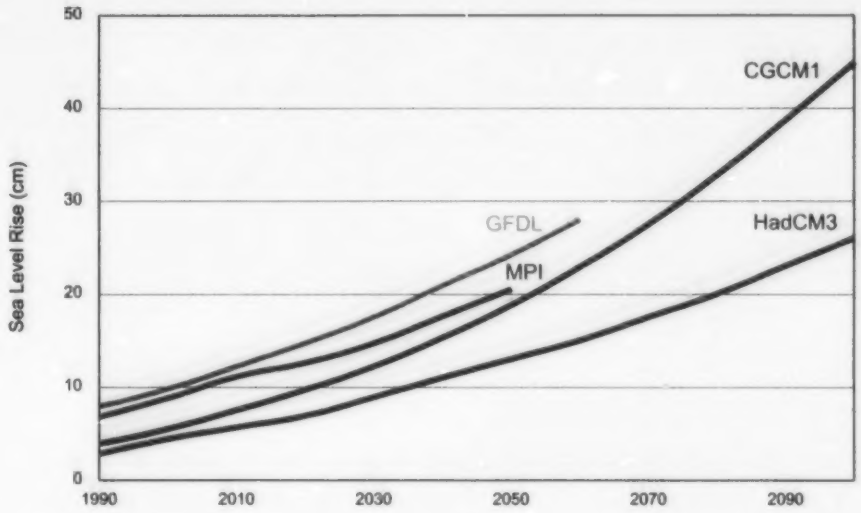
Projected changes over the middle to high latitudes of the Northern Hemisphere are more moderate, in general remaining within 10% of present levels until after 2050. By 2090, precipitation over most of Canada and northern Eurasia increases by 10–20%, although in some regions, like northern Greenland and northern Siberia (which currently receive very little precipitation), it increases by up to 50%. Most of these increases occur during winter. Such trends are consistent with both an increased flow of moisture northward from the tropics and a transition to a more maritime climate as sea ice cover over water bodies decreases.

Combined with warmer temperatures, these changes in precipitation could have important implications for soil moisture. The model indicates, for example, that most of North America would experience a notable decrease in available soil moisture, with the exception of the west coast, which would experience much wetter conditions. The reduction in soil moisture would be greater in summer. By the 2090s, regions such as Canada's southern prairies would experience serious summer deficiencies in soil moisture.

These changes illustrate the sensitivity of regional temperatures and water resources to global change, but like all regional projections they are subject to considerable uncertainty and should be used with caution. Assessments of potential regional impacts of climate change should never use such results in isolation but should take account of the results of other models as well.

FIGURE 10

PROJECTED GLOBAL SEA LEVEL RISE



Sources: CCCma; IPCC Data Distribution Centre

Sea level rise due to thermal expansion of sea water as projected by CGCM1 and three other model experiments. Rates of change for three of the models are very similar, while the fourth is lower.

Sea Level Rise. As the world's atmosphere and oceans become warmer, sea levels are expected to rise. This is mainly the result of the thermal expansion of ocean waters, although the melting of glaciers and changes in the volume of the polar ice sheets play significant but secondary roles. The results (Figure 10) show a rise in average global sea level due to thermal expansion of approximately 5 cm during the twentieth century and an additional rise of 40 cm by the last two decades of the twenty-first century. This is larger than the IPCC's 1995 projection for thermal expansion of 26 cm by 2100, but the magnitude and rates of related sea level rise are broadly similar to those predicted by some other recent model experiments.

CGCM1's projections of sea level rise also show some substantial regional differences (Figure 11). In the Arctic Ocean, for example, thermal expansion results in a rise of only about 10 cm by the 2090s. In comparison, the eastern Pacific off British Columbia expands by 65 cm, the equatorial Atlantic by almost 50 cm, and the northwestern Atlantic east of the Maritimes by almost 40 cm. These results reflect regional differences in ocean temperature changes as well as other factors.

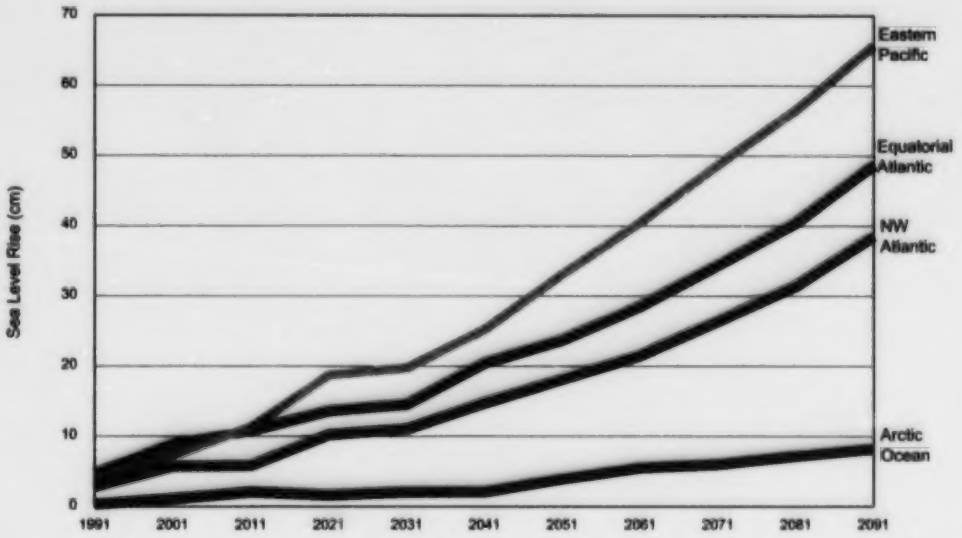
EXTREME EVENTS

Extreme climatic events are those that are rare both in their intensity and in the frequency of their occurrence. Because ecosystems and the physical infrastructure of human societies are "tuned" to normal climate conditions, they are generally poorly equipped to cope with such events. As a result, changes in the occurrence of extreme events can often have far greater detrimental impacts on ecosystems and human societies than a change in average climate conditions.

To some extent, deciding what is and what is not an extreme event is a subjective exercise. Consequently, climatologists use a variety of statistical criteria to identify such events. One of the more common is the concept of a return period. For example, an extreme event might be described as one that

FIGURE 11

REGIONAL CHANGES IN SEA LEVEL



Sources: CCCma

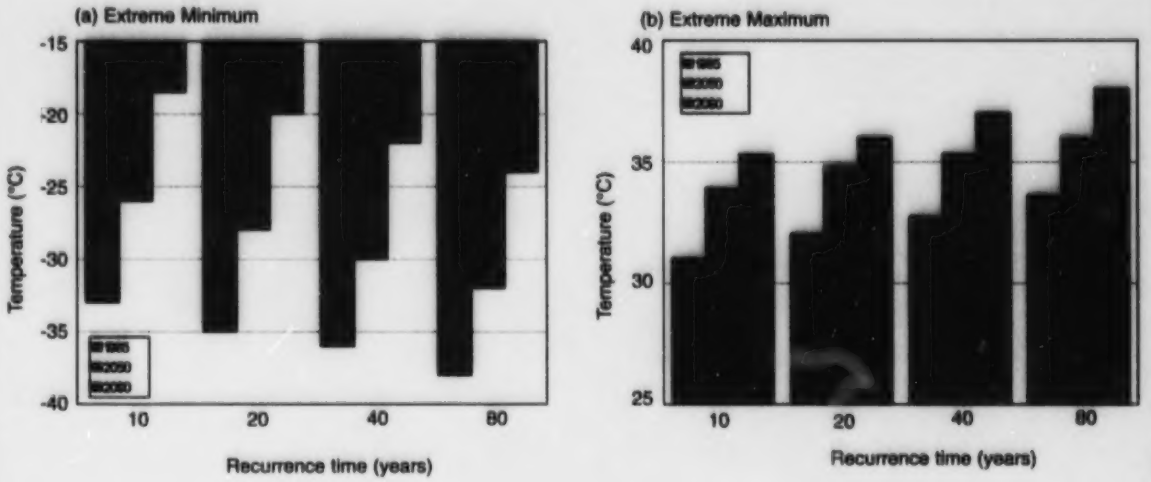
Because of different rates of ocean warming and local changes in atmospheric pressure patterns, the rates of change in sea levels due to thermal expansion vary significantly from region to region.

has a statistical probability of happening no more than once every 20 years. Such an event would then be said to have a return period of 20 years.

At the present time, models such as CGCM1 can only give us partial answers to the questions that we have about extreme events. The best information that they can provide relates to changes in extremes that occur on a large spatial scale, like those for temperature or wind speeds, and they can also provide useful information about the direction of change in extremes of other climate variables. Because of their low resolution, however, current models are poorly suited to providing more detailed information, particularly at the regional level where many extreme events take place. Furthermore, because extremes occur infrequently, very long simulation periods are needed before enough of these events are available for reliable statistical analysis. Similarly, very long records of observations of real events are needed to provide the reference base against which the model's results can be compared. As a result, validating the model's performance in simulating extremes can be very difficult. A few studies have tried to resolve this dilemma by embedding a very high-resolution sub-model of a specific geographical area within the global climate model. However, most studies with the present generation of global models still focus largely on the larger-scale aspects of changes in climate extremes. The CGCM1 studies described here followed this latter approach and concentrated primarily on large-scale changes in surface pressure, temperature, precipitation, and wind extremes. Some regional details have also been included in these studies, but confidence in these is much lower than for the larger-scale results. The following are some general results that have emerged from these studies.

FIGURE 12

PROJECTED CHANGES IN EXTREME TEMPERATURES



Source: Kharin and Zwiers (2000)

CGCM1 projections of changes in the magnitude of average Canadian (a) extreme daily minimum and (b) extreme daily maximum temperatures that can be expected to recur once every 10, 20, 40, or 80 years.

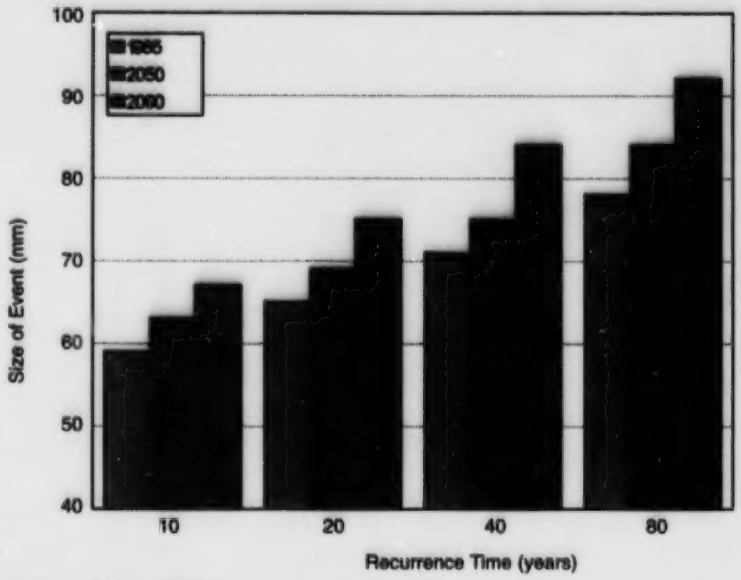
Daily Temperature Extremes. As the Intergovernmental Panel on Climate Change noted in its *Second Assessment Report* in 1995, small changes in average climate conditions can generate significant changes in extremes. However, changes in extreme temperatures can be very much influenced by changes in other climate factors as well. The disappearance of snow cover, for example, greatly enhances daytime surface warming and hence midday maximum temperatures. Drier soils can also add to the intensity of daytime temperatures by reducing cooling from surface evaporation. Conversely, while an increase in average temperature will tend to reduce the occurrence of extremely cold temperatures, in some regions the disappearance of sea ice or snow cover will significantly amplify this moderating effect by allowing much more heat to be transferred from the ocean and soil to the atmosphere, especially at night.

As Figure 12 shows, cold extremes across Canada (as represented by daily minimum temperatures) are expected to become less severe with time. By the 2050s, for example, the model projects cold extremes that now occur once every 10 years will likely occur less than once every 80 years. In some regions, these changes will be even more dramatic. In the Arctic, where average annual temperatures are projected to warm by 10–20°C during the last half of the century, extreme minimum temperatures over open waters are expected to moderate considerably. The extreme minimum temperature with a return period of 20 years, for example, will be 25°C warmer over open ocean areas by the 2050s than it is now and 40°C warmer by the 2090s.

While extreme minimum temperatures will generally become more moderate in a warmer climate, extreme maximum temperatures can also be expected to become hotter. This increase can be seen in CGCM1's projections for extreme daily maximum temperatures averaged across Canada. These show that an extreme maximum temperature that has an 80-year return period today is likely to occur about once every 10 years

FIGURE 13

PROJECTED CHANGES IN EXTREME PRECIPITATION



Source: Kharin and Zwiers (2000)

Magnitude of average Canadian extreme 24-hour rainfall events for various return periods as projected by CGCM1.

by 2050. By the 2090s, the magnitudes of these extreme high temperature events are expected to increase, on average, by 4–5°C.

A variety of physical processes, however, produce some interesting regional variations in the high temperature extremes projected by CGCM1. In the Arctic and sub-Arctic, for example, the one-in-twenty-year maximum temperature extreme changes little by 2050 and only moderately by 2090, since ocean waters in these regions warm very little. In the northwestern Atlantic, as well as in other regions where the model shows oceans cooling in summer, the one-in-twenty-year extreme actually decreases. Something similar also occurs over India, where the threshold for extreme daily maximum temperatures initially decreases and then returns to current levels, in this case because of an increase in monsoonal precipitation. In sharp contrast are the changes projected for such areas as the southeastern United States and the central plains of North America, where decreases in soil moisture result in less evaporation and hence greater heating of the surface air mass. In these regions, the daily maximum temperature extremes projected by CGCM1 increase by up to 12°C by 2050, as compared to average daily temperature changes of 3–4°C over the same period.

Precipitation Extremes. Analyses of the return periods of extreme precipitation events in the CGCM1 simulations suggest that rainfall will, on average, become more intense in almost all regions of the world, although the magnitude of such changes is still rather uncertain. Some of the greatest increases are expected in equatorial regions, particularly over the tropical Pacific. In this region, CGCM1 projects precipitation rates for one-in-twenty year extremes to rise by some 50 mm/day by the 2050s and by more than 70mm/day by the end of the century. An important factor in these changes is an increase in the evaporation of water from the oceans as they warm. Over continental North America, average precipitation rates for the one-in-twenty year extremes are projected to change by up to 10 mm/day by the 2050s. Such

changes already suggest that damaging precipitation events can double in frequency. By the 2090s, however, increases of up to 40 mm/day in the one-in-twenty year extremes are simulated in the Gulf of Mexico region and the southeastern United States, and increases of 10–20 mm/day are projected in eastern Canada. When averaged over all of Canada, today's one-in-forty year extremes could become a decadal occurrence by the 2090s (Figure 13).

Results from these simulations also suggest that the extreme lengths of wet periods (days with more than 1 mm of rain) may decrease over many tropical and subtropical continental regions as the climate warms. The projected impact on extreme lengths of dry periods (consecutive days with less than 1 mm of rain) appears to be more variable. These are projected to increase in the Mediterranean, southern Africa, and southeast Asia, but they decrease over most of central Africa and change little over South America. Little change is indicated for Canada. However, the magnitudes of all such changes in wet and dry periods are even more uncertain than those for precipitation extremes.

Intense Low Pressure Events. Large storms can be identified in model climates as areas of low pressure, and the severity of a particular storm can be gauged by the intensity of the low pressure at its centre. Equilibrium change experiments with earlier atmospheric models showed a general decrease in storm conditions in response to a doubling of carbon dioxide in the atmosphere. However, very intense extra-tropical storms (which were defined as those with a central pressure of less than 97 kPa) were seen to increase significantly. A study of storm behaviour was also carried out using CGCM1's transient change simulations. It reveals a similar pattern: a slight decrease in the total number of extra-tropical storm events around the world by the 2090s but an increase of more than 30% in the number of very intense storms. The model shows the greatest change taking place in the occurrence of intense storms in the Southern Hemisphere.

FUTURE DIRECTIONS

Climate modelling is a continuing process in which models are constantly refined so that climate mechanisms can be simulated more realistically and greater confidence can be had in the results. At the Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis this process has led to the development of a second and a third generation of coupled climate models.

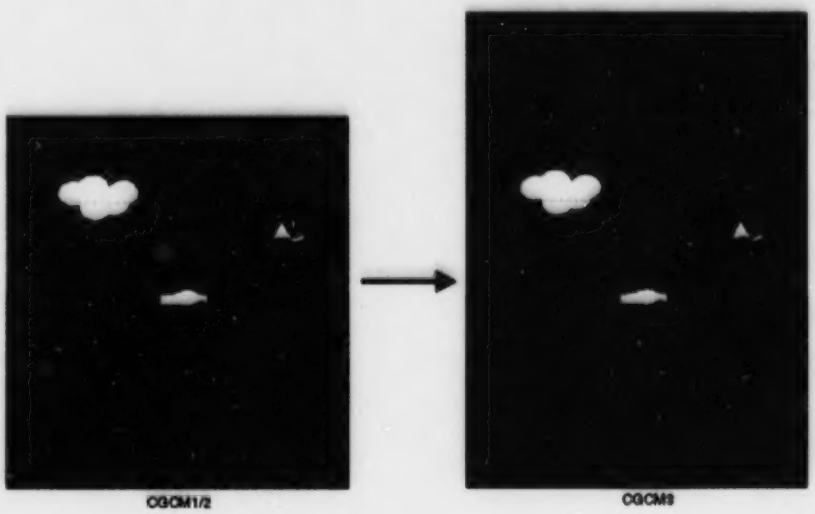
The second-generation model, known as CGCM2, uses the same atmospheric component as CGCM1, but its ocean component has been improved with the addition of a more realistic mixing scheme. The new model also has a more sophisticated sea ice component that simulates the transport of sea ice and the effects of ice deformation, both of which influence energy flow between atmosphere and ocean. The transport of ice also determines where sea ice eventually melts. CGCM2 has been used to conduct a similar suite of experiments to those described above. The results are now being analyzed and prepared for publication.

As of early 2000, the third-generation model, incorporating both a third-generation atmospheric model and a new ocean model, was in the advanced stages of development (Figure 14). The atmospheric model, GCM3, is an advanced version of GCM2. Like its predecessor, it has a physical resolution of about 3.7° of latitude and longitude, but processes controlling sea water movement are simulated at a higher resolution of approximately 2.8° of latitude (about 275 km) by 2.8° of longitude. The model is also thicker vertically. Whereas GCM2 covers 30 km of atmosphere in 10 layers, GCM3's atmosphere extends some 50 km above the earth's surface and is divided into 32 layers. Other features of the atmospheric component include:

- a new method for describing land surface processes. Known as CLASS, this new land surface scheme is considerably more detailed than the single soil-layer scheme used in GCM2. It includes three soil layers, a snow layer where applicable, and can even represent the effects of a vegetative canopy. Surface properties such as roughness and reflectivity are linked to the types of soil and vegetation and to soil

FIGURE 14

IMPROVING THE STRUCTURE OF THE CGCM



Source: G. Flato

Schematic comparing some of the differences between the structures of CGCM1 and 2 with that for CGCM3.

moisture conditions present within a given grid square of the model;

- better representation of the turbulent transfer of heat and moisture, and of atmospheric motion within the planetary boundary layer (the layer of the atmosphere closest to the surface);
- improved simulation of convective behaviour in the atmosphere (such as that associated with cumulus clouds);
- a more detailed description of solar heating;
- better representation of surface topography;
- improved simulation of surface winds and pressure distribution.

The new ocean model, known as NCOM1.3, was developed at the National Center for Atmospheric Research in Boulder, Colorado, and is based on the MOM model used in CGCM1 and CGCM2. The new model includes improvements in the representation of ocean physical processes and has been coded to take advantage of more modern computer architecture. The sea ice component is similar to that used in CGCM2 but has been improved so that the model can now determine how much of each grid cell is covered by ice and how much is open water.

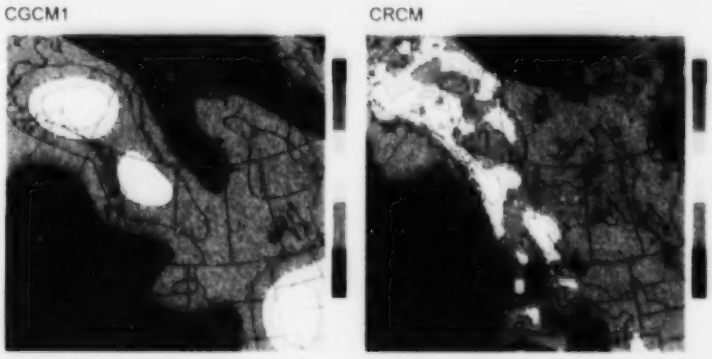
Regional Climate Models

Improving the simulation of regional climates continues to be one of the biggest challenges facing climate modellers. The main obstacle is the relatively coarse resolution of existing global climate models, since many of the processes that affect regional climates occur on a scale that is smaller than the smallest spatial unit or grid cell that present-day models can represent. The models use a variety of methods to approximate the average effect of these processes, but local variations are consequently overlooked. Much higher resolution global models would provide a solution to this problem but would also require considerably more computer capacity. Doubling the resolution in three dimensions and reducing the time step for calculations, for example, increases computational requirements by a factor of more than sixteen.

Regional climate models (RCMs) are a solution to this dilemma. These are high resolution models that can simulate climate features and physical processes in much greater detail for a limited area of the globe while drawing information about conditions at their boundaries from the larger global models. A Canadian RCM has recently been developed through the collaboration of a modelling team at the Université du Québec à Montréal and the CCCma team in Victoria. The regional model represents physical processes in much the same way as GCM2 and incorporates all of that model's advanced features. The Canadian RCM (CRCM) can be used for any region of the world and can be nested in the global model and run in tandem with it. Such nesting is a one-way process, with information flowing from the global model to the regional model but not in the opposite direction.

The performance of the CRCM has recently been tested in a series of simulations of the current climate and a doubled carbon dioxide climate for western Canada. Using a spatial resolution of 45 km (almost 10 times greater than that of GCM2, within which it was nested), the model showed increased spatial variability and detail in near-surface climate conditions, as one would expect from the greater topographical detail represented. However, there was little change in spatial variability in the free atmosphere well above the surface.

As of early 2000, three "time slice" experiments for the present and for two periods in the twenty-first century had been completed for western Canada, and a corresponding set of experiments for eastern Canada was scheduled to begin. These experiments used outputs from one of the transient climate change experiments described earlier in these pages.



Source: G. Flato

Comparison of detail in precipitation patterns over western Canada as simulated by CGCM1 and the CRCM.

CONCLUDING REMARKS

What is the value of climate model research? What does it contribute to our understanding of climate change? And how much confidence should we place in the results?

The ability of the CGCM1 experiments to successfully reproduce the general characteristics of the global climate since 1900 is a good indication that its simulation of climatic processes is largely correct, and we can therefore be fairly confident that its estimate of how the global climate is likely to change over the next century is realistic. The results of experiments into future climate change with CGCM1 and other advanced models confirm what earlier models have already indicated: that the probability of extensive climate change is both real and imminent. They suggest that the rate and magnitude of warming over the next century could certainly be within the upper range of previous expectations, if not higher. If this is so, both natural ecosystems and human societies will have difficulty adapting to a rate of climatic change that is virtually without precedent. Hence the related risks are significant.

That being said, however, it should be borne in mind that the model's results are approximations and not a precise forecast of future conditions. The accuracy of the model's projections depend, in part, on the accuracy of its assumptions about future changes in greenhouse gases and aerosols as well as the precision with which it simulates climatic processes such as water vapour and cloud response or changes in ocean circulation. If concentrations of greenhouse gases and aerosols change at rates that are significantly different from the estimates used in the model, then the model's projections will become increasingly unrealistic. Changes in natural forces that are not considered by the model could also have a noticeable effect on the actual course of climate change. An upsurge in volcanic activity, for example, or a decrease in the intensity of solar radiation could slow the rate at which the planet's temperature rises. However, these forces are unlikely to do more than partially offset the steadily rising effect of increasing concentrations of greenhouse gases. Conversely, the future role of aerosols in masking the full effects of rising greenhouse gas concentrations may have been overestimated, or the ocean's response to changing temperatures may be more abrupt than the models project. In these cases, the rate of change may be significantly more rapid and dangerous than projected by the CGCM1 experiments.

As policy makers begin to deal with the enormous challenge of reducing greenhouse gas emissions through the Kyoto Protocol, negotiating subsequent international agreements, and developing policies for reducing the harmful impacts of climate change, improved global and regional climate models will be needed to provide increasingly reliable insights into the consequences of unmitigated climate change and into the effects that different options for reducing greenhouse gas emissions will have on reducing the risks of change. They also need to provide plausible scenarios of future climate which can be used to test the sensitivity of ecosystems and social infrastructures and to support the challenging task of developing appropriate adaptive strategies to reduce the related risks. The future efforts of the CCCma and other modelling groups promise to contribute significantly to improving such scientific information.

BIBLIOGRAPHY

Boer, G.J., G. Flato and D. Ramsden. 2000. A transient climate change simulation with greenhouse gas and aerosol forcing: projected climate for the 21st century. *Climate Dynamics* (in press).

Boer, G.J., G. Flato, M.C. Reader and D. Ramsden. 2000. A transient climate change simulation with greenhouse gas and aerosol forcing: experimental design and comparison with the instrumental record for the 20th century. *Climate Dynamics* (in press).

Flato, G.M., G.J. Boer, W.G. Lee, N.A. McFarlane, D.Ramsden, M.C. Reader and A.J. Weaver. 2000. The Canadian Centre for Climate Modeling and Analysis Global Coupled Climate Model and its climate. *Climate Dynamics* (in press).

Hansen, J.E., M. Sato and R. Ruedy. 1997. Radiative forcing and climate response. *Journal of Geophysical Research* **102**: 6831-6864.

Houghton, J.T., B.A. Callander and S.K. Varney (eds). 1992. *Climate Change 1992.* The supplementary report to the IPCC Scientific Assessment. Cambridge University Press, Cambridge

Houghton, J.T., L.G. Meira Filho, B.A. Callander, N. Harris, A. Kattenberg and K. Maskell (eds.). 1996. *Climate Change 1995: The science of climate change.* Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge.

IPCC Data Distribution Centre. Data web site at http://ipcc-ddc.cru.uea.ac.uk/.

Kharin, V.V. and F.W. Zwiers. 2000. Changes in the extremes in an ensemble of transient climate simulations with a coupled atmosphere-ocean GCM. *J. Climate* (in press).

Lean, J., J. Beer and R. Bradley. 1995. Reconstruction of solar irradiance since 1610: Implications for climate change. *Geophysical Research Letters* **22**: 3195-3198.

NOAA. Climate data web site at http://www.ncdc.noaa.gov/ol/climate/research/

Schimel, D., D. Alves, I. Enting, M. Heimann et al. 1996. Radiative forcing of climate change. In *Climate Change 1995: The science of climate change.* Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. J.T. Houghton, L.G. Meira Filho, B.A. Callander, N. Harris, A. Kattenberg and K. Maskell, eds. Cambridge University Press, Cambridge.

Shine, K.P., R.G. Derwent, D.J. Wuebbles and J.J. Morcrette. 1990. Radiative forcing of climate. In *Climate Change: The IPCC Scientific Assessment.* J.T. Houghton, G.J. Jenkins and J.J. Ephraums, eds. Cambridge University Press, Cambridge.

Environnement Canada
Environment Canada

Climatique

Projections du climat futur du Canada

CCD 00-01
Édition spéciale

Environnement Canada
Environment Canada

PROJECTIONS DU CLIMAT FUTUR DU CANADA

DISCUSSION DE SIMULATIONS RÉCEMMENT EFFECTUÉES AVEC LE MODÈLE CANADIEN DU CLIMAT DU GLOBE

PRÉPARÉ PAR

HENRY G. HENGEVELD

SERVICE MÉTÉOROLOGIQUE DU CANADA
ENVIRONNEMENT CANADA

Le présent document s'inscrit dans le rapport sur l'état de l'environnement

Ce papier contient un minimum de 50% de fibres recyclées
dont 10% de fibres recyclées aprés consommation.

INTRODUCTION ET REMERCIEMENTS

Projections du climat futur du Canada *a été rédigé pour fournir au milieu de la recherche sur les impacts du climat, aux décideurs et au grand public du Canada un résumé des résultats d'expériences récentes de changement climatique menées avec la première version du modèle canadien couplé du climat, décrire comment ils ont été obtenus, et discuter tant leur crédibilité que leurs limites. Ce document est le troisième d'une série d'éditions « spéciales » des Sommaires du changement climatique, qui visent à expliquer et à évaluer notre compréhension actuelle (ou les lacunes à cet égard) de certains des aspects les plus complexes et les plus controversés de la science du changement climatique.*

Il a été rédigé par Henry Hengeveld, conseiller scientifique principal sur le changement climatique, de la Direction de l'évaluation et de l'intégration scientifiques, Service météorologique du Canada (SMC), et révisé par David Francis, de Lanark House Communications (Toronto).

L'auteur tient à remercier de leur précieux apport (fourniture de données, révision et/ou critiques) les personnes suivantes, du SMC et de l'extérieur : George Boer, Greg Flato, Steve Lambert et Francis Zwiers (Centre canadien de modélisation et d'analyse du climat -Victoria); Doug Whelpdale (Directeur, Direction de la recherche climatologique -Downsview); Rob Cross et John Stone (Politiques et affaires ministérielles -Ottawa); Daniel Caya (Université du Québec à Montréal). Patti Edwards (SAIB) a aussi fourni une contribution appréciée en préparant nombre des graphiques et en y mettant la dernière main, et en faisant la lecture d'épreuve du texte final.

La version française de ce rapport a été traduite par Marie-France Guéraud, du Bureau de la traduction, Travaux publics et Services gouvernementaux (Montréal), et révisée par Guy Fenech (SAIB). La mise en page, les illustrations et la production technique ont été réalisées par BTT Communications (Toronto).

Ce rapport est disponible sous forme électronique sur le site Web de SAIB, à l'adresse **www.tor.ec.gc.ca/apac/.**
On peut aussi se procurer des copies papier supplémentaires gratuites en en faisant la demande écrite à :

Direction de l'évaluation et de l'intégration scientifique
Direction générale des sciences atmosphériques et climatiques
Service météorologique du Canada
4905, rue Dufferin
Downsview (Ontario)
M3H 5T4

(416) 739-4432

Publié avec l'autorisation du ministre de l'Environnement

© Ministère des Travaux publics et Services gouvernementaux Canada 2000

Catalogue No. En57-27-2000-01F
ISBN 0-662-64900-1
ISSN 0835-3980

TABLE DES MATIÈRES

LE SYSTÈME CLIMATIQUE ET LES MODÈLES DU CLIMATM 1

LE MODÈLE COUPLÉ CANADIEN 3

ÉVALUATION DE LA PERFORMANCE DU MCCGI 5

COMPARAISONS DE MODÈLES 5

SIMULATIONS DE L'HISTOIRE RÉCENTE DU CLIMAT 7

PROJECTIONS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE FUTUR EFFECTUÉES À L'AIDE DU MCCGI 10

RÉSULTATS DES PROJECTIONS DU CLIMAT 11

PROJECTION DES TENDANCES D'ICI 2100 11

TENDANCES EN AMÉRIQUE DU NORD ET DANS LES RÉGIONS AVOISINANTES 15

PHÉNOMÈNES EXTRÊMES 19

ORIENTATIONS FUTURES 23

CONCLUSION 26

ENCADRÉS

DÉMARRAGE DU MODÈLE COUPLÉ DU CLIMAT 4

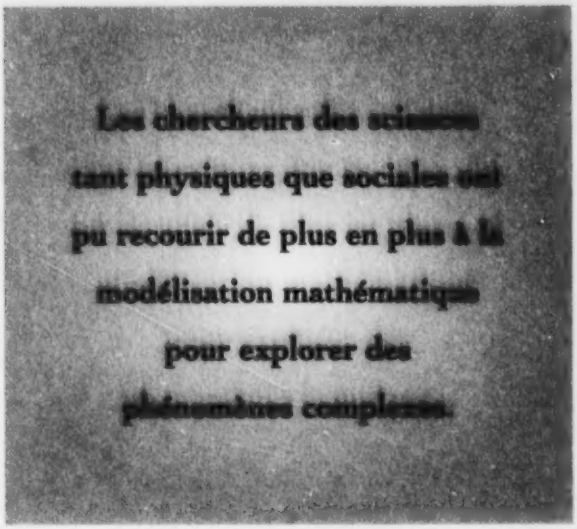
CAUSES POSSIBLES DU CHANGEMENT CLIMATIQUE RÉCENT 8

COMPARAISONS AVEC LES PROJECTIONS D'AUTRES MODÈLES DU CLIMAT 14

MODÈLES DES CLIMATS RÉGIONAUX 25

LE SYSTÈME CLIMATIQUE ET LES MODÈLES DU CLIMAT

Grâce à la phénoménale croissance de la puissance informatique survenue depuis une vingtaine d'années, les chercheurs des sciences tant physiques que sociales ont pu recourir de plus en plus à la modélisation mathématique pour explorer des phénomènes complexes. Les modèles mathématiques lient les diverses équations qui décrivent les relations et processus clés en jeu dans un système pour simuler le comportement ce celui-ci. En modifiant la valeur de certaines variables, les scientifiques peuvent étudier comment le système répond à des changements, qu'ils soient internes ou externes. Comme les processus du système ne peuvent jamais être parfaitement compris, les modèles doivent nécessairement simplifier la réalité. Leurs résultats doivent donc être utilisés avec prudence. Néanmoins, dans de nombreux domaines, ils ont atteint un tel degré de fiabilité qu'on les utilise de façon courante à des fins opérationnelles ou de recherche. À l'heure actuelle, les modèles mathématiques sont régulièrement utilisés à des fins très diverses : analyser le comportement du marché, préparer des prévisions météorologiques, et tester des armes nucléaires. Dans le domaine de la recherche, ils sont très utiles pour analyser des phénomènes difficiles à étudier en laboratoire ou sur le terrain.


Les chercheurs des sciences
tant physiques que sociales ont
pu recourir de plus en plus à la
modélisation mathématique
pour explorer des
phénomènes complexes.

Ces modèles prennent une importance particulière dans les recherches sur le changement climatique. En fait, le degré de compréhension que nous avons actuellement du système climatique et de sa réponse probable à l'augmentation des concentrations atmosphériques de gaz à effet de serre n'a pu être atteint que grâce à l'existence de ce que l'on appelle les modèles de circulation générale, ou modèles du climat du globe – de puissants programmes informatiques qui simulent le système climatique planétaire en trois dimensions et dans le temps. Si l'on considère l'expertise scientifique nécessaire pour monter ces modèles et les énormes ressources informatiques consommées pour les faire tourner, il n'est pas surprenant que seulement quelques pays soient présentement engagés dans une modélisation sophistiquée du climat.

Le Canada est l'un d'eux, avec une présence active dans le domaine de la modélisation du climat qui remonte aux années 1970. Ces travaux, qui exigent une étroite collaboration entre des scientifiques d'Environnement Canada et les universités, se font maintenant au Centre canadien de modélisation et d'analyse du climat (CCmaC), situé à Victoria, en Colombie-Britannique. Au fil des ans, les modélisateurs canadiens du climat ont apporté d'importantes contributions à notre compréhension des processus en jeu et du changement climatique. À l'aube d'un nouveau siècle, au cours duquel le changement climatique pourrait devenir l'un des plus grands problèmes de l'humanité, leurs travaux deviennent encore plus importants, car c'est sur eux que reposeront la sensibilisation du public et la prise de décisions. Le présent rapport examine les récentes activités de recherche menées au CCmaC, et les conclusions qu'on peut en tirer quant à l'évolution probable du changement climatique pendant le prochain siècle. On y trouvera une description du premier modèle couplé du climat du CCmaC et de ses capacités, une revue des résultats et des implications des récentes expériences sur le changement climatique, et une discussion de la fiabilité de ces résultats. En outre, on comparera les résultats des expériences du CCmaC avec ceux d'autres groupes de modélisation. Enfin, le rapport examinera rapidement les développements actuels et futurs des recherches canadiennes par modélisation du climat.

Les préoccupations actuelles quant au changement climatique tiennent à deux faits clairs et incontestés. Le premier est que les gaz à effet de serre, comme le dioxyde de carbone et le méthane, ralentissent la vitesse à laquelle la Terre renvoie de la chaleur vers l'espace, et donc

contribuent au réchauffement de son atmosphère. Le second est que les concentrations de ces gaz augmentent en conséquence des activités humaines.

Cette augmentation, qui est déjà très considérable et qui va se poursuivre tant que les émissions de gaz à effet de serre ne seront pas réduites de façon draconienne, devrait conduire à un réchauffement de la surface et de la basse atmosphère de la planète. Nous ne pouvons cependant pas dire avec certitude de quel ordre sera ce réchauffement, non plus que nous ne pouvons déterminer dans l'immédiat quels autres aspects du climat seront touchés, parce que le système climatique de la Terre est d'une effarante complexité. En effet, il n'est pas seulement régi par les processus en jeu dans l'atmosphère proprement dite; il fait aussi intervenir des interactions entre les océans, les surfaces des terres, les organismes vivants, et les masses de glace polaires. Une modification significative d'un de ces éléments peut entraîner des changements importants des autres. Ceux-ci peuvent à leur tour déclencher diverses rétroactions, qui induisent de nouvelles modifications du premier changement; dans certains cas, il s'agira d'une compensation ou d'une atténuation, dans d'autres d'un renforcement.

Pour déterminer l'effet probable d'un changement tel que l'accroissement des concentrations de gaz à effet de serre sur le changement climatique, il faut examiner la réponse du système dans son ensemble. Les modèles du climat sont essentiels pour y parvenir, parce qu'ils intègrent les principaux processus qui interviennent dans le système climatique, et calculent les ajustements et rajustements des divers éléments en réponse au changement original.

Les premiers modèles qui pouvaient le faire ont vu le jour vers la fin des années 1970. Ils simulaient le comportement de l'atmosphère terrestre en trois dimensions, représentant le fonctionnement des processus climatiques non seulement à la surface de la Terre, mais aussi à divers niveaux en altitude. Cependant, la puissance informatique disponible à l'époque étant limitée, leur simulation du système climatique manquait nécessairement de raffinement. Les océans, qui jouent un rôle majeur dans le transport de chaleur d'une partie du globe à l'autre, étaient représentés de façon très simplifiée, et leurs interactions avec l'atmosphère seulement de manière très générale. Les nuages, dont les effets sur le réchauffement de l'atmosphère varient avec la structure, l'altitude et la fraction de ciel couverte (ainsi qu'avec le moment de la journée), étaient aussi mal représentés et ne pouvaient pas réagir aux changements d'autres conditions atmosphériques. La représentation du cycle hydrologique, qui a d'importantes implications pour les nuages, les précipitations, l'humidité du sol, et le réchauffement par effet de serre, était tout aussi sommaire. De plus, les premiers modèles n'avaient qu'une résolution très grossière. En fait, ils ne pouvaient représenter les variations des paramètres du climat simulé qu'à des échelles d'environ 800 km ou plus. C'est donc avec une précision très limitée qu'étaient reproduits un grand nombre de processus climatiques.

Vers la fin des années 1980, cependant, les progrès des techniques de modélisation, de la compréhension des processus climatiques et de la puissance des ordinateurs ont permis d'élaborer une deuxième génération de MCG. La représentation des océans y était encore très simplifiée, mais les interactions entre la couche d'eau superficielle et l'atmosphère étaient beaucoup mieux rendues. En plus, la résolution spatiale avait été améliorée, la description du cycle hydrologiques était plus détaillée, et la glace de mer et les nuages répondaient aux changements du climat du modèle. Les chercheurs ont alors pu explorer ce qu'ils appelaient le changement climatique à l'équilibre, autrement dit les nouvelles conditions climatiques qui régneraient une fois que le système se serait stabilisé en réponse à un changement donné des concentrations de gaz à effet de serre – en général un doublement. Les modèles ont donné des indications précieuses sur la sensibilité du système climatique à une hausse des concentrations de gaz à effet de serre, mais ils ne pouvaient toujours pas simuler de façon satisfaisante ce qu'on appelle le climat aux états transitoires, c'est-à-dire le comportement du système climatique pendant qu'il est en train de changer plutôt qu'une fois qu'il a fini de changer. La capacité de modéliser les états transitoires est essentielle, parce qu'elle fournit une meilleure approximation de l'évolution que nous voyons dans le climat d'une année et d'une décennie à l'autre, et permet donc de tester de façon plus rigoureuse jusqu'à quel point le modèle réussit à simuler le comportement historique du système réel.

Pour simuler le climat aux états transitoires, les modèles devaient offrir une bien meilleure représentation des processus océaniques, et donc disposer d'encore plus de puissance informatique. À la fin des années 1980 et au début des années 1990, divers groupes de modélisation commençaient à avoir cette capacité, et une troisième génération de modèles du climat, beaucoup plus sophistiqués, a vu le jour. Connus sous le nom de modèles couplés de la circulation générale de l'atmosphère et de l'océan, ou plus simplement de modèles couplés du climat, ils consistent en un MCG atmosphérique pleinement couplé à un modèle tridimensionnel détaillé de l'océan. Cette caractéristique, combinée à d'autres raffinements, leur confère la capacité de modéliser le climat de façon beaucoup plus réaliste.

À l'heure actuelle, il y a dans le monde plus de 20 modèles de ce genre en utilisation ou en développement. Le Centre canadien de modélisation et d'analyse du climat a terminé la construction de son premier modèle couplé, le MCCGI, au milieu des années 1990 et l'a utilisé depuis pour une série d'expériences de changement climatique aux états transitoires, dont les résultats ont été mis à la disposition du centre de distribution de données du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) pour qu'ils puissent être utilisés dans les recherches sur les impacts du changement climatique. En 1999, la National Academy of Science des États-Unis a aussi identifié le MCCGI comme l'un des modèles donnant actuellement les meilleures performances dans la simulation du changement climatique et recommandé que ses résultats soient utilisés dans l'évaluation nationale du changement climatique effectuée par son pays.

LE MODÈLE COUPLÉ CANADIEN

Le MCCGI est une bonne illustration à la fois des caractéristiques évoluées et des limites persistantes des modèles du climat les plus avancés à la fin du vingtième siècle. Il a quatre composantes clés :

1. Un *modèle de la circulation générale de l'atmosphère*, le MCGII, à 10 niveaux verticaux et une résolution horizontale d'environ 3,7° de latitude et de longitude (à peu près 400 km). Cette résolution se compare à celle utilisée dans la plupart des MCG atmosphériques, bien que certains arrivent maintenant à des résolutions inférieures à 300 km. Les caractéristiques des nuages et de la nébulosité répondent interactivement aux autres changements du système climatique.
2. Un *modèle de la circulation générale de l'océan* capable de reproduire les caractéristiques à grande échelle de la circulation océanique, ainsi que d'importantes propriétés de l'eau, comme la température et la salinité. Connu sous le nom de module océanique modulaire (MOM), il a été développé par le Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, à Princeton, New Jersey, et modifié pour être utilisé dans le MCCGI. Il a 29 niveaux verticaux et une résolution horizontale d'environ 200 km. Cette résolution, bien que deux fois plus fine que celle du modèle de l'atmosphère, est encore inadéquate pour bien décrire tous les nombreux processus qui régissent le comportement des océans.
3. Un *modèle thermodynamique de la glace de mer*, qui reproduit la croissance et la fonte de la glace en réponse aux échanges de chaleurs avec l'océan et l'atmosphère. Les ouvertures dans la couverture glacielle sont représentées par une relation avec la quantité de glace présente. Ce modèle des glaces avait aussi été utilisé dans les précédentes simulations à l'équilibre faites avec le MCG de deuxième génération du CCmaC.
4. Un *modèle de la surface des terres* simple, qui calcule le ruissellement et l'humidité du sol à partir de l'équilibre entre les précipitations, l'évaporation en surface, et la capacité de rétention d'eau du sol. Ce dernier paramètre varie avec l'endroit, ainsi que selon le type de sol et ses propriétés. Bien que la végétation ne soit pas incluse directement dans le modèle, certains de ses effets sont approximés en spécifiant différentes profondeurs de sol et taux d'évapotranspiration aux divers endroits.

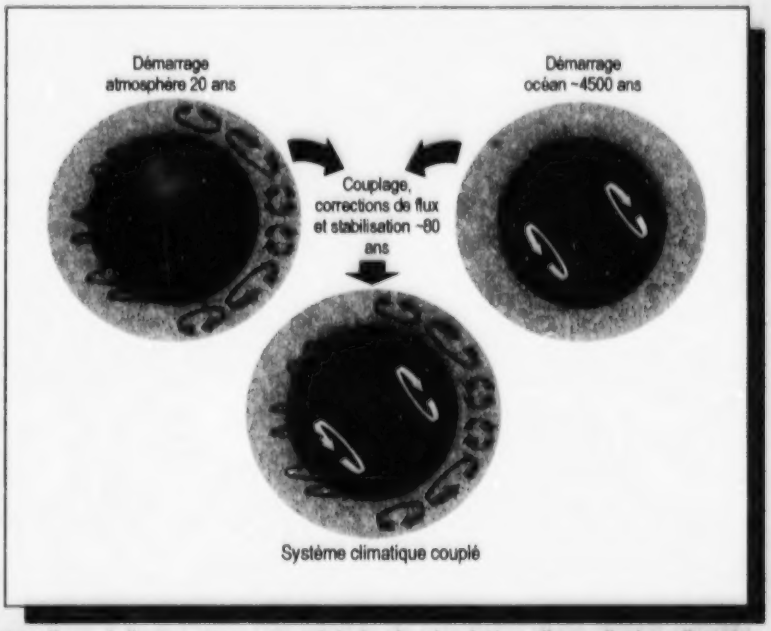
Pour utiliser le modèle, on doit d'abord démarrer séparément les composantes atmosphérique et océanique jusqu'à un état d'équilibre équivalent au climat présent, et les coupler de manière que l'atmosphère et l'océan interagissent sur une base quotidienne. Cependant, des erreurs dans le transfert modélisé de la chaleur et de l'humidité entre l'océan et l'atmosphère peuvent faire dériver le modèle avec le temps et induire des résultats irréalistes. On pense que ces erreurs sont liées à des omissions et inexactitudes dans certaines des approximations des processus océaniques et atmosphériques entrées dans le modèle.

Les groupes de modélisation ont adopté deux solutions différentes pour régler ce problème de dérive. Certains postulent que la dérive restera la même pendant toute la durée de l'expérience de changement climatique, et peut donc être soustraite des résultats une fois le taux de dérive déterminé dans les simulations du climat actuel. La plupart de groupes, dont le CCmaC, cependant, ont tenté d'éliminer la dérive en apportant des ajustements aux flux de chaleur et d'eau douce entre l'océan et l'atmosphère. Ces corrections de flux, comme on les appelle, sont alors utilisées dans toutes les expériences effectuées avec le modèle. Les deux méthodes ont certes leurs avantages et inconvénients, mais les chercheurs ne peuvent pas écarter la possibilité que l'une comme l'autre introduisent des erreurs imprévues dans les résultats expérimentaux. Les chercheurs du CCmaC et d'ailleurs ont accordé un grande priorité à la réduction et à l'élimination à terme de ce besoin de corrections de flux dans les modèles futurs.

Démarrage du modèle couplé du climat

Les modèles de circulation générale simulent le système climatique en utilisant des équations mathématiques pour décrire le bilan radiatif de la Terre, la manière dont il se traduit en chaleur et en mouvement, et le fonctionnement du cycle hydrologique. Cependant, avant de pouvoir être utilisés dans les études du climat, ils doivent être « démarrés » pour atteindre un certain état d'équilibre dans le système climatique simulé. Pour l'atmosphère, ce « démarrage » peut être réalisé sur quelques heures de temps simulé. Par contre, les océans, qui réagissent beaucoup plus lentement, exigent plusieurs milliers d'années de démarrage pour atteindre un état d'équilibre approximatif.

Pour ne pas gaspiller de précieux temps de calcul, les composantes atmosphériques et océaniques d'un modèle couplé sont généralement démarrées séparément avant d'être assemblées, bien qu'il faille encore programmer certaines interactions de base entre l'atmosphère et les océans dans chaque composante pendant le démarrage. Dans le cas du MCCGI, la composante atmosphérique est d'abord couplée à un système océanique en couche mélangée sans circulation, avec des températures de surface de la mer approximativement égales aux valeurs observées; on la fait ensuite tourner jusqu'à ce qu'on approche l'équilibre. Le modèle atmosphérique tourne ensuite sur 20 ans de plus, de manière que les chercheurs puissent calculer le flux moyen d'énergie et d'eau douce entre l'atmosphère et la surface de l'océan, et estimer les vents en surface sur l'océan. Cette information est alors utilisée pour démarrer le modèle océanique, qui tourne sur une période simulée de plus de 4500 ans, pour atteindre un équilibre proche des conditions réelles observées. À ce point, les deux composantes sont couplées. Cependant, les deux démarrages étant séparés, il persiste de grandes différences entre les estimations des quantités de chaleur et d'humidité échangées entre l'océan et l'atmosphère faites par les deux composantes. Si ces flux ne sont pas équilibrés, il peut s'ensuivre avec le temps une grande dérive du climat simulé. C'est pourquoi on applique au système couplé un ajustement des flux basé au départ sur les écarts entre ces valeurs.



Les deux composantes du modèle peuvent alors interagir pleinement et s'adapter l'une à l'autre pour une période de simulation d'une dizaine d'année. D'autres ajustements sont alors apportés pour minimiser la dérive qui pourrait persister dans le système couplé. Celui-ci tourne encore sur 70 ans pour permettre aux irrégularités initiales du système de s'estomper. Une fois stabilisé, on fait tourner le modèle dans ce mode de « contrôle » sur une période de simulation pouvant atteindre 1000 ans, pour obtenir une sortie statistique utile dans l'étude de la variabilité naturelle du climat du modèle. Cette information sert aussi à évaluer la capacité du modèle à approximer le système climatique réel, et aussi comme référence de comparaison pour les résultats d'expériences de changement climatique menées avec le modèle.

ÉVALUATION DE LA PERFORMANCE DU MCCGI

Cette nécessité d'apporter des corrections de flux nous rappelle que les modèles sont des approximations simplifiées d'une réalité très complexe, et que leurs résultats doivent être interprétés avec prudence. C'est pourquoi les groupes de modélisation consacrent beaucoup d'efforts à évaluer la fiabilité de leurs modèles. Ces évaluations non seulement permettent de déterminer dans quels domaines la performance du modèle est acceptable et dans lesquels elle est faible, mais aussi aident les chercheurs à interpréter les résultats des expériences et à raffiner les composantes du modèle.

Il y a diverses façons d'évaluer la performance d'un modèle. Un des tests de base concerne sa capacité à reproduire les principales caractéristiques du climat actuel. Les autres grandes vérifications portent sur sa capacité à simuler les changements climatiques du passé et sa performance par rapport à d'autres modèles du climat.

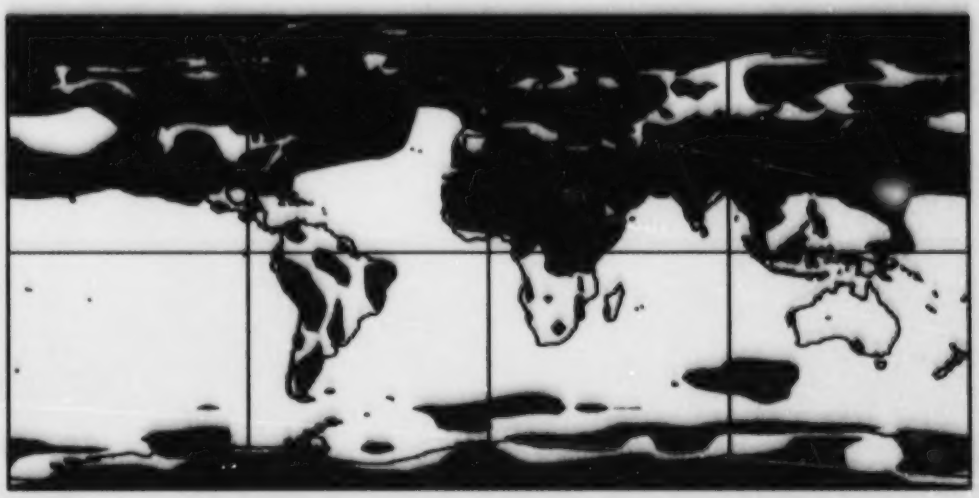
COMPARAISONS DE MODÈLES

On procède à des comparaisons des sorties des modèles avec le climat observé et avec les résultats d'autres modèles dans le cadre du Programme mondial de recherches sur le climat, essentiellement par le biais du Projet de comparaison des modèles de l'atmosphère et plus récemment du Projet de comparaison des modèles couplés. Les résultats de ces comparaisons et d'autres études confirment que le MCCGI produit une description généralement réaliste des caractéristiques d'échelle planétaire du système climatique de la Terre. En particulier,

- le MCCGI est très stable, avec une très faible dérive de 0,15 °C par siècle (environ 10 fois moins que les changements de température que devrait causer dans les prochaines décennies l'impact des activités humaines sur le système climatique);

FIGURE 1

ÉCARTS ENTRE LES TEMPÉRATURES DE SURFACE MODÉLISÉES ET OBSERVÉES



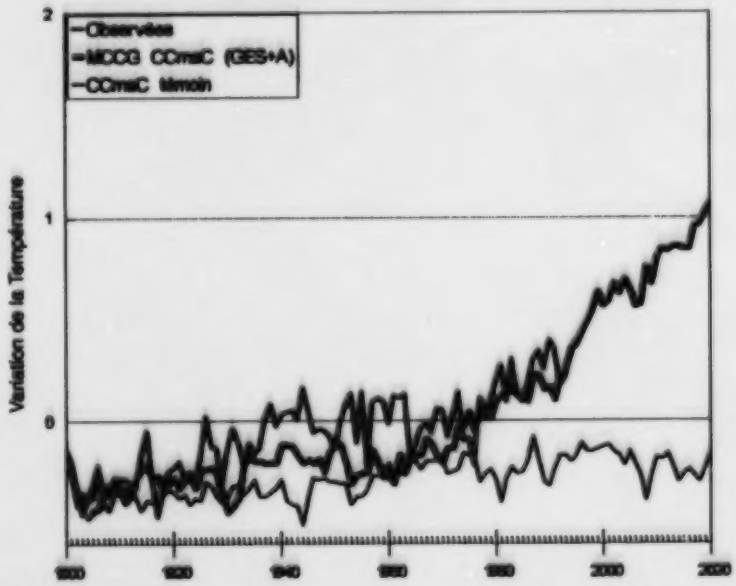
Source: Flato et al. (2000)

Différences entre les simulations par le MCCGI et les observations de la température en surface, montrées ici pour les mois de décembre, janvier et février. En général, les températures simulées concordent assez bien avec les conditions observées. Il y a cependant des écarts significatifs sur certaines zones des terres et sur l'océan Arctique.

- les températures planétaires moyennes, les régimes de la pression au niveau de la mer, et la circulation atmosphérique sont proches de celles observées dans la réalité. Il reproduit aussi des caractéristiques similaires à l'Oscillation australe (qui joue un rôle dans le phénomène El Niño), l'Oscillation nord-atlantique (liée à des changements périodiques des régimes météorologiques en Europe), et d'autres caractéristiques de la variabilité interne du climat. À cet égard, la performance du modèle le classe parmi les meilleurs des modèles couplés testés dans le cadre de programmes de comparaison. Cependant, comme le montre la figure 1, il présente des écarts notables entre sa simulation des températures régionales sur les terres en hiver et les conditions observées. C'est en terrain montagneux et sur l'océan Arctique que ces écarts sont les plus marqués. En outre, alors que le MCCGI rend très bien la variabilité interannuelle des températures sur les terres, il la sous-estime sur certaines zones océaniques, comme le Pacifique tropical;
- les régimes planétaires des précipitations semblent aussi rendus de façon réaliste, mais ils sont plus difficiles à évaluer que ceux de la température et de la pression;
- les régimes de circulation, de salinité et de transport de chaleur dans l'océan se situent généralement dans la plage des estimations basées sur les observations. Dans les régions polaires, on constate certains écarts entre les régimes simulés et les régimes observés;
- l'extension de la glace de mer est raisonnablement bien approximée dans l'Antarctique, mais sous-estimée en été comme en hiver dans l'Arctique. La couverture nivale planétaire concorde bien avec les observations, surtout en hiver, mais elle est surestimée dans certaines régions (p. ex. le plateau de Mongolie) et sous-estimée dans d'autres (p. ex. l'ouest de l'Europe). Certains de ces écarts sont peut-être dus à la médiocrité des données d'observation plutôt qu'à des déficiences du modèle.

FIGURE 2

TENDANCES PROJETÉES ET PRÉVUES DE LA TEMPÉRATURE AU XX^{E} SIÈCLE



Sources: Flato et al. (2000); NOAA

Tendances et variations des températures planétaires moyennes en surface simulées par la passe de contrôle du MCCGI (ligne bleue) et par une des passes GES + aérosols (ligne rouge), comparées aux tendances observées du climat (ligne noire).

Simulations de l'histoire récente du climat

On a aussi testé le MCCGI pour déterminer s'il peut simuler de manière réaliste les changements survenus dans le climat mondial au cours du dernier siècle. Pour ce faire, on a effectué une série d'expériences. La première était une passe de contrôle dans laquelle les concentrations de gaz à effet de serre et autres forces de changement externes étaient gardées constantes. On voulait ainsi obtenir un point de référence avec lequel comparer les résultats des autres expériences. Une deuxième expérience (GES) ne faisait intervenir que les augmentations des concentrations de gaz à effet de serre, converties en concentration équivalente de dioxyde de carbone. Enfin, un ensemble de trois expériences a examiné les effets des gaz à effet de serre et d'un autre facteur, les aérosols de sulfates. Ce sont de minuscules particules en suspension dans l'atmosphère qui, comme les gaz à effet de serre, sont essentiellement un sous-produit de la combustion de combustibles fossiles. À l'inverse des gaz à effet de serre, cependant, ils ont un effet refroidissant sur les températures en surface parce qu'ils renvoient vers l'espace le rayonnement solaire incident. Les aérosols sulfatés se distinguent aussi des gaz à effet de serre en ce qu'ils ont une durée de vie relativement courte. Ils sont donc concentrés en aval des régions où ils se sont formés (surtout l'est de l'Amérique du Nord et l'Eurasie), et leurs effets ont tendance à être plus localisés que ceux des gaz à effet de serre, dont le temps de résidence atmosphérique est beaucoup plus long et qui sont donc distribués plus également sur la planète.

Chacune des expériences faisant intervenir les gaz à effet de serre et les aérosols démarrait avec des conditions initiales légèrement différentes, de manière à introduire dans la simulation une approximation de la variabilité naturelle et du bruit au sein du système climatique. Les changements de la concentration et de la distribution des aérosols sulfatés étaient basés sur des estimations indépendantes effectuées par des spécialistes des aérosols à l'aide de modèles chimiques. Les scénarios tant de gaz à effet de serre que d'aérosols utilisés dans les expériences étaient semblables à ceux utilisés par d'autres groupes de modélisation.

Le modèle ne prenait pas en compte les effets indirects des aérosols sulfatés sur les propriétés des nuages, et donc sur le climat, parce que ceux-ci ne sont pas encore bien compris. De même, on avait laissé de côté les effets des variations d'intensité du rayonnement solaire, de l'appauvrissement de l'ozone stratosphérique, et des changements des concentrations des aérosols non sulfatés, même s'il est certain que ces facteurs ont eu une influence sur le climat au cours du dernier siècle (voir l'encadré *Causes possibles du changement climatique récent*).

Lorsque les expériences ont été faites, la simulation ne faisant intervenir que les gaz à effet de serre surestimait l'ampleur du changement des températures, avec une augmentation globale de 0,8 °C depuis 1900, un peu supérieure à ce qui a été observé. En outre, la répartition spatiale du réchauffement ne montrait pas non plus les zones de refroidissement en surface mises en évidence par les observations.

Les trois expériences intégrant à la fois les gaz à effet de serre et les aérosols ont par contre reproduit le climat du dernier siècle avec un assez bon réalisme. Comme le montre la figure 2, la hausse modélisée de 0,6 °C de la température moyenne de la planète concorde avec les meilleures estimations issues des enregistrements climatologiques, bien que le modèle ait tendance à sous-estimer les températures moyennes du milieu du XX^{e} siècle, peut-être en raison de la variabilité naturelle ou de changements de certains forçages du climat qui n'étaient pas pris en compte par le modèle.

En outre, l'allure générale du changement climatique montré par les expériences du modèle était qualitativement semblable à ce qui a été observé. Le maximum de réchauffement dans le centre et le nord de l'hémisphère Nord se produisait en hiver, et des poches de refroidissement se formaient sur certaines parties des océans et, en été, sur des régions limitées des continents. Le maximum de réchauffement dans l'hémisphère Sud touchait les latitudes moyennes des océans. Les détails du changement diffèrent d'une expérience à l'autre, ce qui à la fois donne une indication concrète de la capacité du modèle à simuler la variabilité du climat naturel et montre comment ces fluctuations aléatoires peuvent rendre les effets des gaz à effet de serre et des aérosols plus difficiles à détecter.

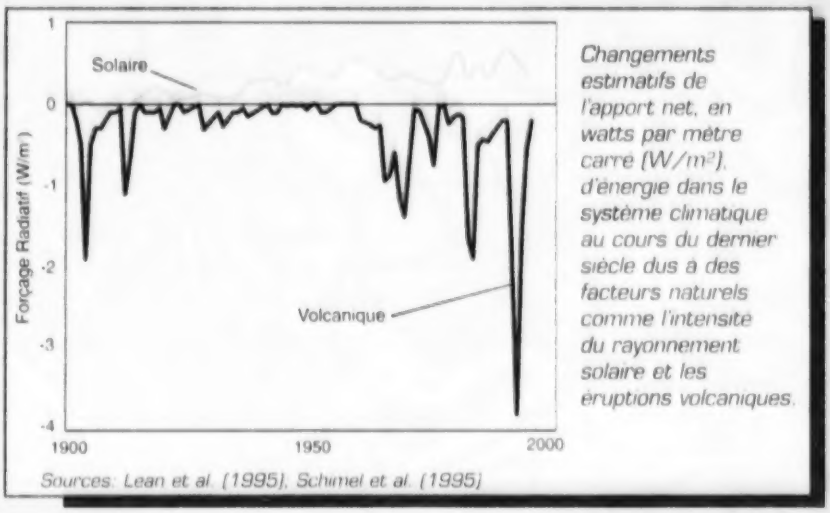
Ces expériences ont donc permis de conclure que les processus internes du MCCGI donnent une bonne image de la réalité.

CAUSES POSSIBLES DU CHANGEMENT CLIMATIQUE RÉCENT

Les scientifiques pensent que, au cours du dernier siècle, plusieurs processus externes au système climatique ont agi sur les tendances du climat de la planète. Ils sont illustrés par les figures ci-dessous.

- ***Changements d'intensité du rayonnement solaire.*** *L'apport d'énergie du Soleil varie légèrement d'une décennie à l'autre, et l'on a aussi des indications que l'intensité du rayonnement solaire a augmenté quelque peu au cours des 3 derniers siècles. Les causes de ces fluctuations décennales et de la tendance à plus long terme ne sont pas encore bien comprises, et l'ampleur de ces changements est entachée de beaucoup d'incertitude, mais ils peuvent avoir des effets importants sur notre climat. Les meilleures estimations suggèrent que, au cours du dernier siècle, ils ont fait augmenter d'environ 0,2 watts par mètre carré la quantité d'énergie gagnant les bas niveaux de l'atmosphère. Certains experts avancent que la tendance à l'augmentation de l'intensité du rayonnement solaire peut se renverser au cours du prochain siècle.*

- ***Changements des concentrations d'aérosols stratosphériques.*** *Les éruptions volcaniques explosives, comme celle du mont Pinatubo en 1991, peuvent injecter de grandes quantités d'aérosols (c.-à-d. des particules liquides et solides) directement dans la stratosphère. Ces aérosols, qui sont surtout composés de sulfates, réfléchissent très efficacement le rayonnement solaire incident et, pendant les périodes de concentration maximale qui suivent l'éruption, entraînent un refroidissement net en surface qui peut atteindre 0,5 °C. Cet effet de refroidissement est cependant de relativement courte durée, puisque les aérosols décantent de l'atmosphère en trois à cinq ans, et il ne peut se maintenir que si plusieurs grosses éruptions explosives se succèdent en peu de temps. Entre 1920 et 1960, les concentrations d'aérosols sulfatés dans la stratosphère imputables à ce genre d'éruptions ont été inférieures à la moyenne, ce qui a laissé davantage de rayonnement solaire atteindre la surface de la Terre. Cette situation a pu contribuer à un certain réchauffement en surface au cours de la période, mais l'on pense que l'effet a été minime.*

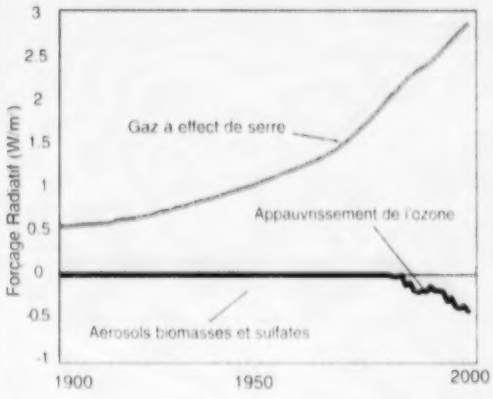


Changements estimatifs de l'apport net, en watts par mètre carré (W/m^2), d'énergie dans le système climatique au cours du dernier siècle dus à des facteurs naturels comme l'intensité du rayonnement solaire et les éruptions volcaniques.

- ***Augmentations des concentrations de gaz à effet de serre.*** *Les concentrations atmosphériques de gaz à effet de serre de longue durée de vie, et donc bien mélangés, se sont accrues de façon substantielle dans toutes les régions du monde. Les concentrations de dioxyde de carbone, par exemple, ont monté de 30 % par rapport aux niveaux de l'époque pré-industrielle, celles de méthane de 145 % et celles d'hémioxyde d'azote de 15 %. Les concentrations d'autres gaz traces, dont certains proviennent uniquement des activités humaines, ont aussi connu une augmentation. Le forçage supplémentaire dû à ces gaz au cours du dernier siècle atteint environ 2,5 watts par mètre carré. Des augmentations supplémentaires des concentrations de ces gaz au cours du prochain siècle pourraient y ajouter 2 à 8 watts par mètre carré.*

- ***Augmentations des concentrations troposphériques d'aérosols.*** *Les concentrations de ces aérosols, qui incluent les aérosols sulfatés, la suie, la poussière minérale et les particules produites lors de la combustion de la biomasse, se sont considérablement accrues au cours du dernier siècle du fait des activités humaines. Comme ces substances restent relativement peu de temps dans l'atmosphère, leurs concentrations sont maximales à proximité des sources, baissent rapidement avec la distance à la source, et à mesure que les sources sont éliminées. La plus grande partie de la hausse des concentrations est*

survenue dans les 50 dernières années, à proximité et en aval de régions industrialisées, et donc surtout dans l'hémisphère Nord. Les effets de ces substances sur le climat sont complexes et encore mal compris. On estime que les effets directs des accroissements passés des aérosols sulfatés (que l'on pense les plus abondants) par réflexion du rayonnement solaire incident ont fait baisser la quantité d'énergie solaire absorbée dans la basse atmosphère et à la surface, d'une valeur comprise entre 0 et 1,5 watt par mètre carré. Leurs effets indirects par modification des propriétés des nuages sont encore très difficiles à estimer; mais pourraient être encore plus élevés. Dans les prochaines décennies, cet effet de refroidissement devrait augmenter substantiellement avec l'accroissement des émissions dans les pays en développement, mais cette tendance pourrait être ralentie, voire renversée, si des mesures de limitation des émissions étaient mises en place dans ces pays.

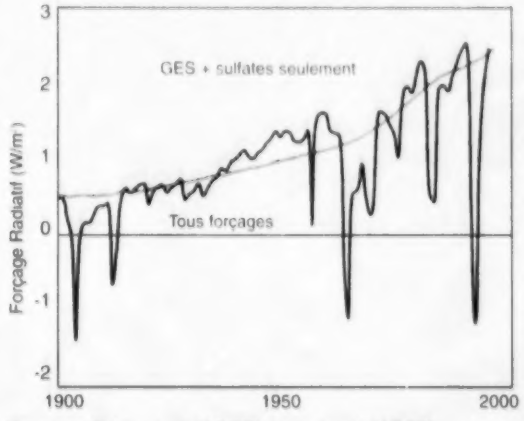


Changements estimatifs de l'apport net d'énergie dans le système climatique au cours du dernier siècle dus à des facteurs anthropiques, dont les gaz à effet de serre bien mélangés (ligne rouge continue), l'appauvrissement de l'ozone stratosphérique (ligne bleue foncée) et les aérosols sulfatés (ligne bleue légère).

Sources: Shine et al. (1990); Schimel et al. (1995); Hansen et al. (1997)

- **Amincissement de la couche d'ozone.** L'appauvrissement de la couche d'ozone stratosphérique dans les 20 dernières années a aussi fait baisser la quantité nette d'énergie thermique conservée dans le système climatique d'une valeur estimée à 0,2 watts par mètre carré. Les études menées avec des modèles du climat et de la chimie de l'atmosphère suggèrent que l'appauvrissement de l'ozone continuera d'influer sur le climat pendant quelques dizaines d'années. Cet effet baissera graduellement si la couche d'ozone se rétablit comme prévu en réponse à l'élimination graduelle des substances destructrices d'ozone aux termes du Protocole de Montréal.

Chacune des forces de changement ci-dessus a son effet propre, dans le temps et dans l'espace, sur le système climatique. En effet, chacune évolue différemment, et a un effet particulier sur le flux de l'énergie dans le système climatique. Par exemple, les changements de l'intensité du rayonnement solaire et des concentrations de gaz à effet de serre ont un effet d'échelle planétaire, alors que ceux des concentrations des aérosols et de l'ozone stratosphérique sont de nature plus régionale. Il reste certes beaucoup à apprendre sur leurs diverses influences sur le climat, mais l'effet net de toutes ces forces semble en gros de même ampleur que l'influence combinée des gaz à effet de serre et des aérosols sulfatés.



Comparaison du forçage radiatif net dû aux changements passés des concentrations de gaz à effet de serre et d'aérosols (ligne orange) utilisés dans les expériences avec le MCCGI (ligne rouge) avec le forçage estimé lorsque l'on prend en compte d'autres facteurs de forçage comme le rayonnement solaire, l'appauvrissement de l'ozone et les aérosols non sulfatés.

Sources: Shine et al. (1990); Lean et al. (1995); Schimel et al. (1995); Hansen et al. (1997)

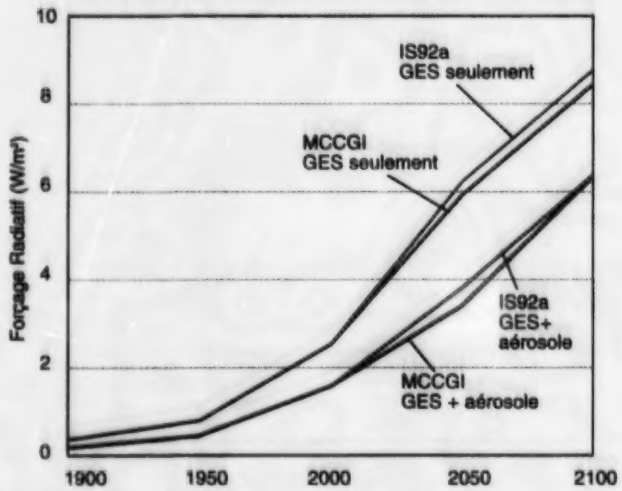
PROJECTIONS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE FUTUR EFFECTUÉES À L'AIDE DU MCCGI

Une fois la crédibilité d'un modèle établie au moyen de simulations réalistes de climats passés et présents et de comparaisons avec d'autres modèles, on peut l'utiliser avec une certaine confiance pour explorer le changement climatique à venir. Pour étudier le changement climatique au cours du XXI^{e} siècle, les modélisateurs du CCmaC ont poursuivi la passe de contrôle, la simulation « GES » et les trois expériences « GES + aérosols » au-delà de 1990 jusqu'à la fin de 2100. La passe de contrôle donnait une base pour évaluer la dérive du modèle et la variabilité naturelle, et un point de référence auquel on pourrait comparer les résultats des autres expériences. En poursuivant l'expérience historique (au lieu de les démarrer « à froid »), on démarrait en marche (« à chaud ») les simulations du changement climatique au XXI^{e} siècle, ce qui permettait de faire en sorte que les changements climatiques qui avaient déjà commencé au XX^{e} siècle et qui évoluaient encore soient incorporés dans les scénarios du changement climatique à venir. Cette méthode assurait aussi que les effets des différences originales dans les conditions initiales des expériences historiques se poursuivraient dans les expériences de la période 1990-2100 et donneraient une indication du degré de variabilité naturelle du climat dans les trois réponses aux changements des gaz à effet de serre et des aérosols.

À partir de 1990, les concentrations combinées de gaz à effet de serre utilisées dans les quatre expériences de changement climatique ont été accrues à raison de 1 % par an, ce qui revient à atteindre en 2050 un doublement des concentrations de dioxyde de carbone de 1980 (ou un triplement des concentrations de l'époque pré-industrielle). En 2100, les concentrations de gaz à effet de serre du modèle sont équivalentes au triple des concentrations de dioxyde de carbone de 1980 et au quadruple des valeurs pré-industrielles.

FIGURE 3

COMPARAISON DE SCÉNARIOS DE FORÇAGE RADIATIF



Sources : GIEC (1992); GIEC (1995); Boer et al. (2000)

Comparaison du forçage planétaire moyen utilisé dans les quatre expériences de changement climatique du MCCGI avec celui estimé pour le scénario IS92a du GIEC utilisé par d'autres groupes de modélisation. La proximité des lignes montre qu'ils sont très semblables.

Bien que plusieurs autres groupes de modélisation aient aussi utilisé le scénario composé à 1 % pour les augmentations des gaz à effet de serre, certains ont pris un autre scénario, proposé en 1992 par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. Appelé IS92a, ce scénario prévoit les augmentations des émissions de gaz à effet de serre du prochain siècle sur la base des estimations des changements de la demande en énergie, de la croissance démographique, et d'autres facteurs. Comme le montre la figure 3, l'énergie supplémentaire disponible au système climatique (ou « forçage planétaire moyen ») est très similaire dans les deux cas.

Dans les trois expériences « GES + aérosols », on postulait que les effets directs des aérosols sulfatés sur le système climatique pour la période 1990–2100 ne changeraient que peu dans les actuelles régions industrialisées de la planète. Cependant, on incluait des augmentations substantielles pour certaines régions en développement, surtout le Mexique, le Moyen-Orient, l'Asie du sud-est, et certaines régions d'Amérique du Sud et d'Afrique. Dans ces régions, les concentrations d'aérosols culminent en 2050 et baissent légèrement par la suite.

Un certain nombre d'autres facteurs, comme les changements d'intensité du rayonnement solaire et l'amincissement de la couche d'ozone, peuvent aussi influer sur le déroulement futur du changement climatique. En raison des incertitudes quant à leurs impacts sur le climat, ces facteurs n'ont pas été inclus dans les expériences. Les chercheurs pensent que la contribution de ces facteurs au changement climatique à venir sera beaucoup moins importante que celle des gaz à effet de serre ou des aérosols sulfatés (voir l'encadré *Causes possibles du changement climatique récent*), mais leur omission dans les expériences risque d'avoir rendu un peu moins réaliste la représentation des changements interdécennaux du climat par le modèle.

RÉSULTATS DES PROJECTIONS DU CLIMAT

Les résultats des cinq expériences de changement climatique menées avec les MCCGI décrites plus haut sont très instructifs quant à l'orientation, l'ampleur et les manifestations à grande échelle probables du changement climatique au cours du XXI^{e} siècle. Ils révèlent non seulement les changements projetés des températures et des précipitations moyennes de la planète, mais aussi les changements éventuels des régimes de circulation océanique, du niveau de la mer, de la glace de mer et des extrêmes climatiques, ainsi que les tendances possibles du comportement du climat au niveau régional, et à l'échelle saisonnière, voire quotidienne.

Avant d'examiner ces résultats en détail, il faut cependant se rappeler qu'ils ne sont qu'un élément d'un processus continu de raffinement des connaissances sur le changement climatique. Bien qu'ils fournissent des indications précieuses sur le climat futur, ils ne sont aucunement définitifs, mais doivent être interprétés à la lumière des connaissances sur les forces et limites du modèle, des résultats d'expériences semblables effectuées avec d'autres modèles, et de notre compréhension générale du système climatique. Ils sont un moyen de valider et de raffiner les évaluations et meilleures estimations actuelles du changement climatique, comme celles publiées par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, et aident à développer de nouvelles estimations basées sur de meilleurs simulations. Celles-ci, à leur tour, seront plus tard modifiées à mesure que l'on disposera des résultats de nouvelles expériences faites avec des modèles encore plus sophistiqués.

PROJECTION DES TENDANCES D'ICI 2100

La discussion ci-dessous des projections du changement climatique au cours du prochain siècle effectuées avec le MCCGI concerne, sauf indication contraire, les résultats des trois passes « GES + aérosols » (les plus réalistes des scénarios utilisés). Comme la variabilité interne du système climatique peut induire des fluctuations interannuelles considérables, les projections du modèles sont calculées en tant que changement entre les conditions moyennes sur une période donnée de 20 ans et celles d'une période de référence de même durée. Pour simplifier les choses, ces périodes sont désignées par leur année centrale. Ainsi, les projections pour « 2010 » visent en fait la période de 2000 à 2020, et ceux de « 2050 » la période de 2040 à 2060. De même, la période allant de 1975 à 1995 est désignée par « 1985 ».

Température. Les passes « GES + aérosols » montrent toutes les trois des tendances très semblables des températures planétaires moyennes en surface. Celles-ci dépassent les valeurs de 1985 d'environ 0,5 °C en 2010 et 1 °C en 2025. L'élévation passe à 1,7 °C en 2050, à environ 3 °C en 2075 et à près de 4,5 °C en 2100. Lorsque les effets de refroidissement des aérosols ne sont pas pris en compte, les augmentations sont encore plus marquées, la hausse des températures planétaires moyennes en surface de la simulation « GES seulement » atteignant 2,4 °C en 2050 et près de 5,5 °C à la fin du siècle. La passe de contrôle, par contre, montre des températures ne s'écartant des valeurs pré-industrielles que de quelques dixièmes de degrés.

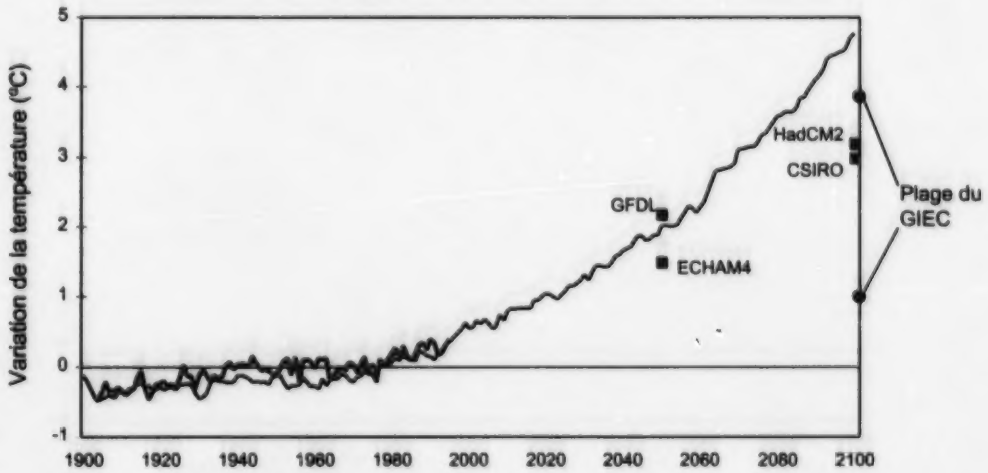
Si l'on regarde au-delà des moyennes planétaires, on peut s'attendre à ce que les températures montent plus vite sur les terres que sur les océans. Dans les trois expériences « GES + aérosols », l'élévation des températures en 2050 est en moyenne de 2,5 °C sur les terres, contre 1,5 °C sur les océans. En 2100, cependant, l'écart se creuse entre les élévations de température sur les terres et sur les océans, les terres s'étant réchauffées de 6 °C et les océans de 3,5 °C.

Lorsque le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat a terminé sa deuxième évaluation du changement climatique pour les Nations Unies, en 1995, il estimait que la plage probable d'élévation de la température moyenne à la surface de la Terre au cours du prochain siècle était de 1 °C à 3,5 °C, si l'on prenait en compte les effets à la fois des gaz à effet de serre et des aérosols sulfatés. Comme le montre la figure 4, les trois simulations « GES + aérosols » du MCCGI restent proches de la borne supérieure de ces estimations jusqu'aux environs de 2060, comme le font d'ailleurs des expériences similaires avec quatre autres modèles avancés. Par la suite, cependant, les projections des divers modèles commencent à diverger en raison de différences dans les caractéristiques des modèles. Le MCCGI indique en 2100 un réchauffement plus élevé que les estimations du GIEC et que les deux autres modèles dont les expériences vont jusqu'à cette date, mais les projections des trois modèles semblent toutes bien au-dessus du milieu de la plage projetée par le GIEC.

Si ces projections de modèles sont correctes, on peut s'attendre à ce que la température moyenne se rapproche

FIGURE 4

CHANGEMENT PROJETÉ DES TEMPÉRATURES PLANÉTAIRES EN SURFACE

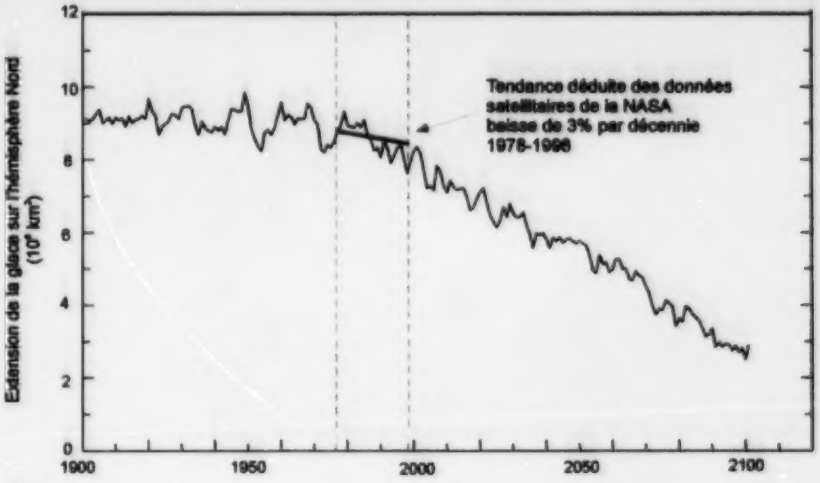


Sources : Boer et al. (2000); centre de distribution de données du GIEC

La simulation faite avec le MCCGI (ligne rouge) projette pour 2100 un réchauffement de plus de 4 °C par rapport aux valeurs de la période 1951–1980 (ligne bleue). On présente aussi, à des fins de comparaison, les résultats des autres expériences de modélisation pour 2050 et 2100 (carrés bleus), ainsi que les tendances observées et la plage de réchauffement projetée par le GIEC en 1995 (lignes noires).

FIGURE 5

CHANGEMENT PROJETÉ DE LA COUVERTURE DE GLACE DE MER DANS L'ARCTIQUE



Source: G. Flato

Le MCCGI projette que la couverture de glace de mer dans l'Arctique sera presque totalement disparue en 2100.

de niveaux qui n'ont pas été connus depuis la période interglaciaire qui a précédé notre dernière grande glaciation, il y a quelque 125 000 ans, et peut-être même les dépasse. La vitesse à laquelle ce changement surviendra sera elle aussi remarquable. Au cours de la transition entre le maximum de la dernière glaciation, il y a environ 25 000 ans, et le début du présent interglaciaire, il y a 10 000 ans, les températures globales ont monté de 4 à 8 °C sur plusieurs millénaires. Or, alors que les élévations projetées de la température au cours du prochain siècle sont sensiblement du même ordre de grandeur, elles se produiront sur une période extrêmement plus courte.

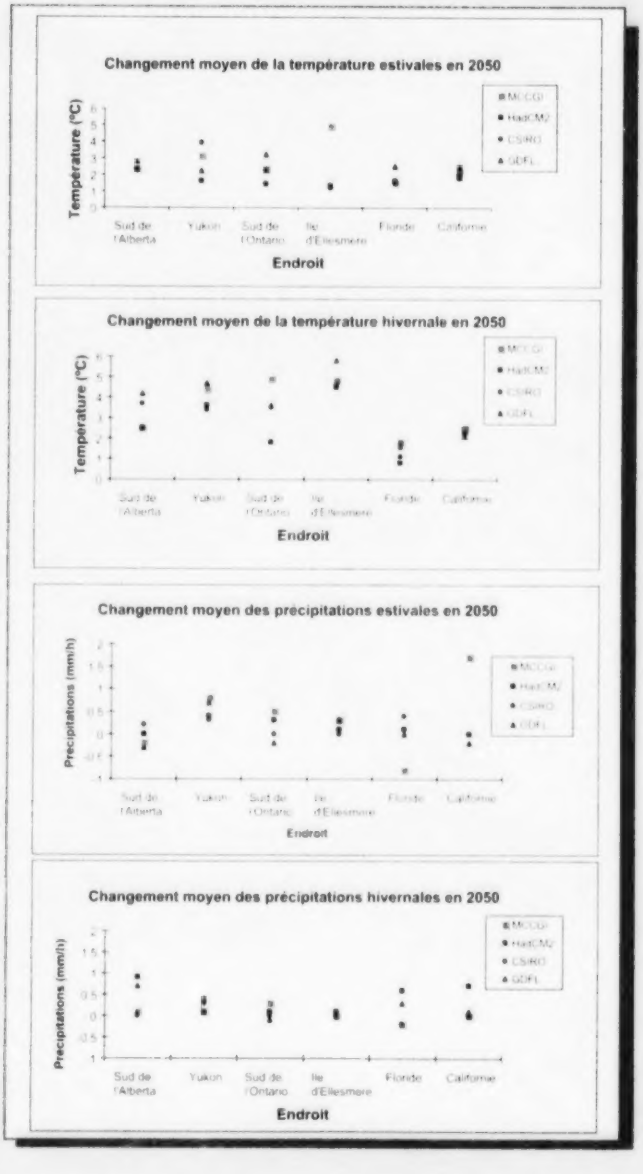
Précipitations. Lorsque la température s'élève, l'évaporation des eaux de surface augmente, et le cycle hydrologique s'accélère. Les précipitations planétaires moyennes devraient donc augmenter elles aussi. Les expériences du MCCGI projettent pour 2050 un accroissement d'environ 1 % avec les passes « GES + aérosols » et de plus de 2 % avec les passes « GES seulement ». Pour 2100, ces estimations montent à 4,5 % et 7 % respectivement. Les augmentations des précipitations surviennent principalement sur les océans (où l'humidité en surface est facilement disponible) et sur les terres aux latitudes plus élevées de l'hémisphère Nord. Ailleurs, les précipitations moyennes sur les terres ne changent pas beaucoup, voire diminuent. En raison de la hausse des températures et de l'évaporation, il y a presque partout sur les terres une baisse de l'humidité moyenne du sol, surtout en été. Sur l'hémisphère Nord, le type des précipitations aussi sera modifié dans un climat plus chaud. La saison de neige sera significativement plus courte, et la superficie enneigée diminuera de plus de 30 % en hiver.

Glaces de mer. Selon les projections du MCCGI, la couverture de glace de mer dans l'hémisphère Nord subira d'importants changements, sa superficie annuelle moyenne étant réduite d'environ 40 % en 2050 et presque nulle en 2100 (Figure 5). Dans le Haut-Arctique, les eaux libres occuperont donc une superficie plus grande, et pendant plus longtemps, ce qui aura de grandes répercussions sur le climat de cette région, puisque l'eau libre permet le transfert de plus d'humidité vers l'atmosphère et absorbe davantage de rayonnement solaire incident. Cette situation, à son tour, entraîne une augmentation des précipitations sur la région, surtout en hiver, et du transfert de chaleur de l'océan à l'atmosphère. Les changements des conditions glacielles dans l'hémisphère Sud, par contraste, sont beaucoup moins prononcés, surtout parce que le réchauffement sera moindre sur les eaux entourant l'Antarctique.

Comparaisons avec les Projections d'autres Modèles du Climat

Plusieurs autres modèles du climat ont été utilisés pour des expériences semblables à celle que nous avons décrite plus haut. Tous montrent un réchauffement significatif pendant le XXIe siècle en réponse aux augmentations des concentrations des gaz à effet de serre et au changement des concentrations des aérosols, avec des hausses de température pour le siècle qui se situent dans la moitié supérieure, voire au-dessus de la plage de 1 à 3,5 °C estimée en 1995 par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. Avec des scénarios de forçage similaires, les groupes de modélisation du Hadley Centre, au Royaume-Uni, du GFDL, aux États-Unis, du MPI, en Allemagne, et du CSIRO, en Australie, ont projeté des élévations de température comprises entre 1,4 et 2,2 °C pour la période 2040–2069, soit une moyenne de 1,8 °C pour l'ensemble des quatre modèles. Par comparaison, la projection du MCCGI pour la même période est d'environ 2 °C. Les autres modèles couplés, en général, montrent des caractéristiques d'échelle continentale comparables à celles du MCCGI, et des régimes similaires de réchauffement plus prononcé sur les terres que sur les océans.

Aux échelles régionale et locale, il se manifeste cependant quelques grandes différences, qui rappellent que l'on ne peut accorder qu'une confiance limitée aux détails des simulations des modèles à ces échelles. Les illustrations ci-dessous comparent avec celles de trois autres modèles les projections du MCCGI des changements de la température et des précipitations qui surviendront entre 2040 et 2060 dans six relativement petites régions d'Amérique du Nord : l'île d'Ellesmere, le nord du Yukon, le centre des Prairies, le sud de l'Ontario, la Floride, et le sud de la Californie. Toutes montrent un réchauffement notable, mais l'écart entre les résultats est aussi très marqué pour presque tous les endroits. Toutes indiquent également des changements relativement faibles des précipitations estivales pour les quatre sites canadiens, mais le MCCGI donne des changements plus prononcés pour les deux sites américains. De même, les 4 modèles prévoient une augmentation des précipitations aux deux sites de l'Arctique, mais ne concordent pas sur l'orientation du changement des précipitations en été dans le sud du Canada. Ils indiquent pour les six endroits que les précipitations hivernales ne changeront pas beaucoup ou augmenteront. Ces résultats nous rappellent que les résultats aux échelles régionale et locale doivent encore être pris avec prudence, surtout en ce qui concerne les précipitations. C'est pourquoi il est important de disposer des résultats d'un certain nombre de modèles avancés lorsqu'on évalue les implications sociales et écologiques du changement climatique.



Circulation océanique. Dans l'Atlantique Nord et au large de l'Antarctique, l'eau de surface devient très froide et très salée, et sa densité la fait s'enfoncer rapidement vers le fond de l'océan en certains endroits. Ce processus, appelé « formation d'eau profonde », joue un grand rôle dans le climat de la Terre, parce qu'il induit une circulation « thermohaline » en boucle dans laquelle l'eau froide qui s'enfonce coule vers le sud dans l'océan profond et de l'eau contenant beaucoup de chaleur remonte vers ces latitudes plus élevées, pour y remplacer l'eau qui s'enfonce. Une grande partie de la chaleur de cette eau est transférée à l'atmosphère.

Les simulations du MCCGI, et d'autres modèles, projettent un ralentissement de la circulation thermohaline au cours du XXI^{e} siècle. En effet, les modèles prédisent qu'un apport accru d'eau douce dans l'Atlantique Nord, dû à l'augmentation des précipitations aux latitudes élevées, devrait réduire la salinité de l'eau de surface et faire baisser de quelque 50 % le taux de formation d'eau profonde en 2100. Cette situation, à son tour, causerait une diminution majeure de l'arrivée d'eau tropicale chaude dans l'Atlantique Nord, qui compenserait en partie le réchauffement atmosphérique prévu pour la région. Certaines petites régions dans le nord-ouest de l'Atlantique et dans l'océan Austral devraient en fait devenir légèrement plus froides qu'elles ne sont présentement.

Tendances en Amérique du Nord et dans les régions avoisinantes

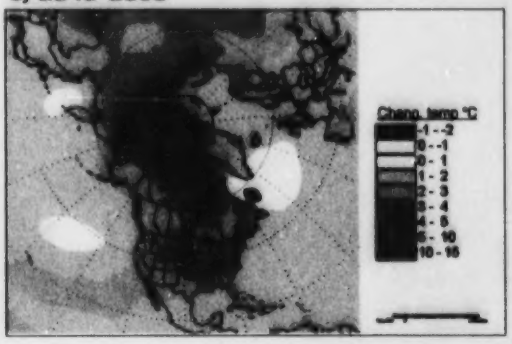
Alors que les moyennes et régimes planétaires donnent une indication utile de l'ampleur et des caractéristiques générales du changement climatique, c'est aux échelles régionale et locale que ses effets seront ressentis et qu'on y répondra. Les changements régionaux, cependant, pourraient être fort différents des moyennes globales. Il est donc très intéressant de voir comment les modèles prévoient le changement climatique à l'échelle régionale. Les projections du climat pour une région sont cependant généralement moins fiables que celles pour la planète, et exigent qu'on fasse preuve de plus de prudence. Les comparaisons entre modèles sont particulièrement importantes à cet égard comme moyen d'estimer le degré d'incertitude des résultats.

Figure 6

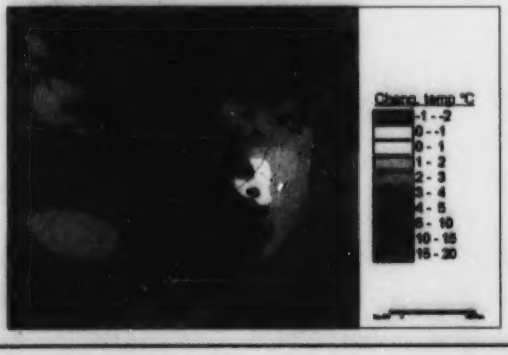
Changement projeté des températures annuelles

a) 2010–2030

b) 2040–2060



c) 2080–2100



Source : CCmaC

Projections faites par le MGCCI du changement des températures annuelles dans l'hémisphère Nord par rapport aux moyennes de 1975–1995 pour (a) 2010–2030, (b) 2040–2060 et (c) 2080–2100.

Température. Comme les masses terrestres se réchauffent plus vite que les océans, le réchauffement sur l'Amérique du Nord devrait dépasser la moyenne planétaire. Dans la plus grande partie du centre et du sud de l'Amérique du Nord continentale, par exemple, le modèle montre une élévation des températures moyennes de 1 à 2 °C en 2020, de 2 à 4 °C en 2050 et de 5 à 10 °C en 2090 (Figure 6). Le réchauffement est sensiblement le même en été qu'en hiver. Les régions côtières et les basses latitudes de l'Amérique centrale se réchauffent plus lentement, mais atteignent aussi une hausse de température de 3 à 5 °C en 2090. C'est cependant sur le Haut-Arctique que le réchauffement est maximal, avec une hausse des températures moyennes annuelles atteignant jusqu'à 3 à 4 °C en 2020, 5 à 10 °C en 2050, et plus de 15 °C dans certains secteurs en 2090.

Les changements en hiver dans l'Arctique sont encore plus spectaculaires, avec des températures moyennes dépassant la moyenne actuelle de beaucoup plus de 20 °C en 2090 (Figure 7). Bien sûr, comme les températures hivernales actuelles dans l'Arctique peuvent descendre bien en-dessous de -40 °C, les hivers y seraient encore froids, mais les résultats du modèle impliquent qu'ils seraient beaucoup moins extrêmes. D'un autre côté, les températures estivales ne montent pas autant, en raison de l'effet modérateur des eaux froides de l'océan Arctique.

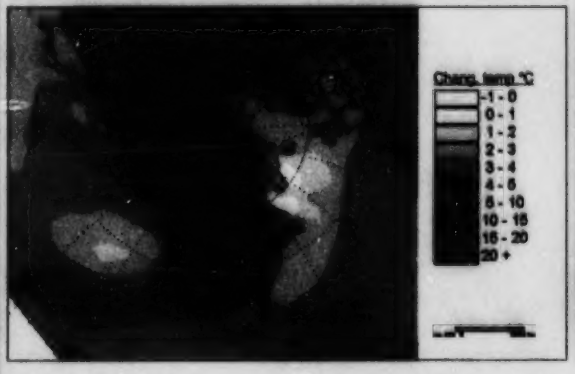
Il y a deux facteurs qui ont une importance particulière dans le changement des températures dans l'Arctique. D'abord, avec le recul de la couverture nivale sur les terres et de la couverture glacielle sur l'océan, la surface de l'Arctique, au lieu de réfléchir comme actuellement une grande partie du rayonnement solaire incident, en absorberait beaucoup plus. Le supplément d'énergie solaire absorbé par la surface s'ajouterait au réchauffement qui a déjà eu lieu. Cet effet est particulièrement important au printemps et en automne dans tout l'Arctique, et aussi en été dans les régions les plus septentrionales. Le second facteur est que, à mesure que le climat se réchauffera, la glace se formera plus tard en automne sur les eaux de l'Arctique, disparaîtra plus tôt au printemps, et sera plus mince en hiver. Son rôle d'isolant entre l'air froid de l'hiver et l'océan plus chaud se trouvera réduit. Il y aura donc plus de chaleur qui pourra être transférée de l'océan dans l'air de l'Arctique pendant la saison froide. L'inverse est bien entendu vrai en été, saison où l'océan se réchauffe beaucoup plus lentement que l'air, ce qui réduit la vitesse de réchauffement de l'atmosphère.

Les tendances des températures sur la masse terrestre du nord de l'Asie sont en gros semblables à celles de

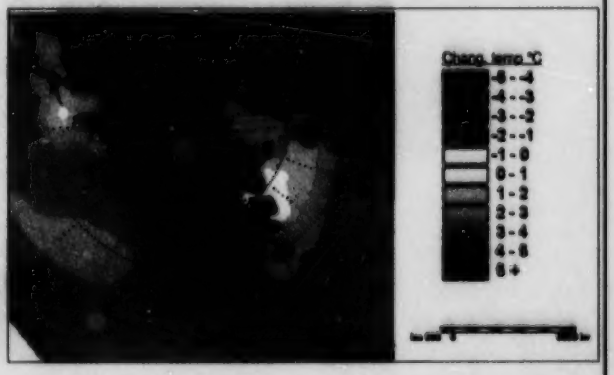
FIGURE 7

CHANGEMENT PROJETÉ DES TEMPÉRATURES SAISONNIÈRES

a) l'hiver



b) l'été.



Source : CCmaC

Projections faites par le MCCGI du changement des températures saisonnières dans l'hémisphère Nord pour la période 2080–2100 par rapport aux valeurs de 1975–1995 pour (a) l'hiver et (b) l'été.

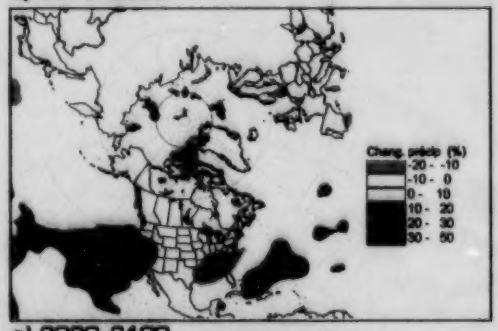
l'Amérique du Nord, le réchauffement sur l'intérieur du continent atteignant 5 à 10 °C en 2090. Cependant, la zone de réchauffement hivernal plus fort correspondant aux régions polaires de l'Amérique du Nord s'étend plus loin vers le sud, jusqu'aux latitudes moyennes. L'Europe, par contre, se réchauffe moins que le nord de l'Asie ou que l'Amérique du Nord. Un des facteurs pourrait en être une rétroaction plus faible de l'albédo de la neige, puisque l'Europe connaît aussi présentement une couverture nivale de moindre étendue. Cependant, une autre influence significative pourrait être le ralentissement du transport de chaleur vers le nord dans l'Atlantique Nord. À l'heure actuelle, les eaux chaudes de l'océan tropical entraînées vers le nord-est par cette circulation libèrent assez de chaleur pour maintenir, sur une grande partie de l'Europe, des températures de quelque 10 °C plus élevées qu'aux latitudes semblables d'autres régions de l'hémisphère Nord. Avec la réduction de moitié du taux de formation d'eau profonde que projette le modèle, l'arrivée d'eau chaude dans l'Atlantique Nord sera aussi ralentie et ses effets de réchauffement sur le nord de l'Europe seront affaiblis, ce qui compensera une partie des effets du réchauffement planétaire. C'est pourquoi le MCCGI projette que les températures moyennes dans le nord et le centre de l'Europe n'auront monté que de quelques degrés en 2050 et d'environ 3 à 5 °C en 2090. Le réchauffement du sud de l'Europe, où les effets de la circulation atlantique sont minimes, sera semblable à celui de l'Amérique du Nord.

Par contraste avec le réchauffement polaire amplifié projeté par le modèle pour les masses terrestres de l'hémisphère Nord et pour l'océan Arctique, le Pacifique Nord et l'Atlantique Nord se réchauffent plus sous les tropiques et moins aux latitudes moyennes à élevées. Cet état de choses semble lié au fait que le transport de chaleur des tropiques aux latitudes plus élevées est plus faible quand la circulation océanique ralentit. Par conséquent, bien que les températures de l'air s'élèvent plus lentement dans les régions tropicales des deux océans que sur les terres, elles auront cependant monté de 1 à 3 °C en 2050 et de 3 à 5 °C en 2090. Aux latitudes moyennes, d'un autre côté, le réchauffement du Pacifique Nord et d'une grande partie de l'Atlantique Nord est limité à 2 à 4 °C en 2090, certaines régions de la mer du Labrador et au sud du Groenland ne montrant aucun changement significatif et, même, une petite zone à l'est du Labrador connaissant un léger refroidissement, surtout en été.

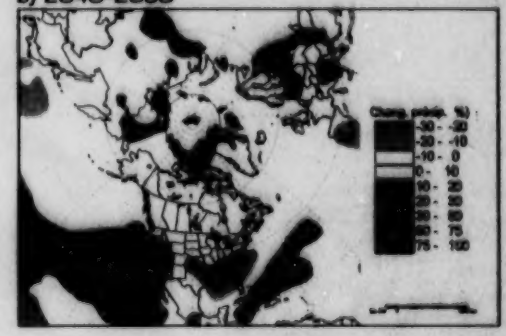
FIGURE 8

CHANGEMENT PROJETÉ DES PRÉCIPITATIONS ANNUELLES

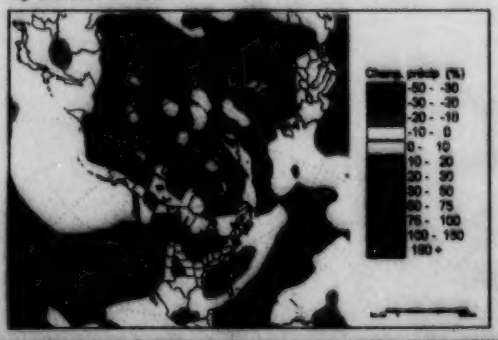
a) 2010–2030



b) 2040–2060



c) 2080–2100

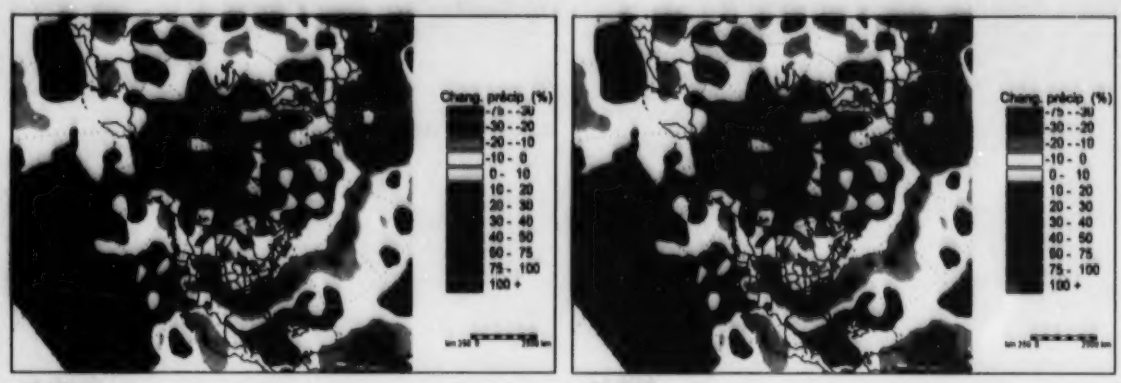


Source : CCmaC

Projections faites par le MCCGI des changements des précipitations par rapport aux moyennes de 1975–1995 pour (a) 2010–2030, (b) 2040–2060 et (c) 2080–2100.

FIGURE 9

CHANGEMENT PROJETÉ DES PRÉCIPITATIONS SAISONNIÈRES



a) l'hiver *b) l'été.*

Source : CCmaC

Projections faites par le MCCGI des changements des précipitations saisonnières en 2080–2100 par rapport aux moyennes de 1975–1995 pour (a) l'hiver et (b) l'été.

Changements des précipitations et de l'hydrologie. Bien que le modèle MCCGI indique une augmentation des précipitations moyennes sur la planète au cours du prochain siècle, il y a des variations notables d'une région à l'autre. Dans le Pacifique tropical, le modèle projette une tendance du type El Niño, avec une baisse des précipitations dans l'ouest du Pacifique mais une hausse marquée dans l'est jusque sur une grande partie de l'ouest des États-Unis. Ces simulations suggèrent que la pluviométrie moyenne annuelle sur la plus grande partie de la Californie, par exemple, pourrait dépasser les valeurs actuelles de 30 à 50 % en 2020, de 100 % en 2050, et de plus de 150 % en 2090 (Figure 8). Les changements sont plus prononcés en hiver qu'en été (Figure 9).Par contraste, une grande partie du centre et du sud de l'Amérique du Nord pourrait connaître des baisses significatives des précipitations annuelles d'ici 2090, surtout dans le sud-est, où on prévoit qu'elles pourraient atteindre 30 %. Ces diminutions sont plus marquées en hiver qu'en été. Le sud de l'Europe pourrait aussi voir des baisses dépassant 30 %.

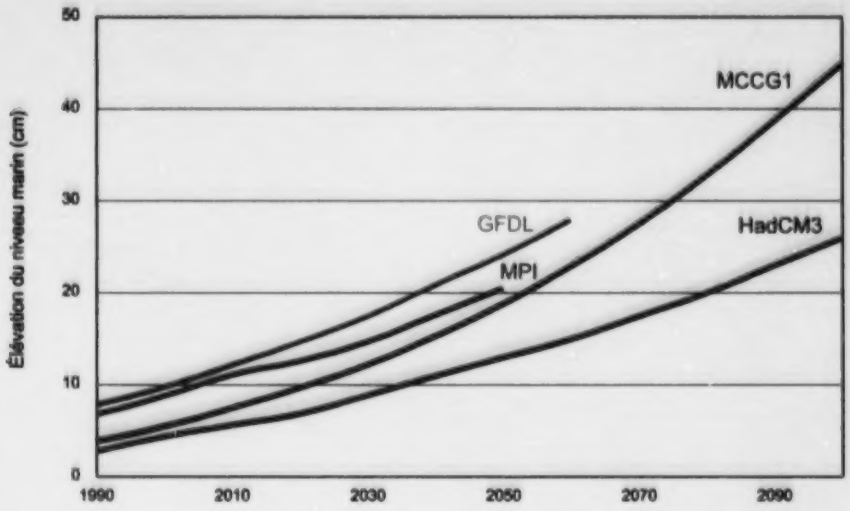
Les changements projetés pour les latitudes moyennes à élevées de l'hémisphère Nord sont moins marqués, restant en général dans une plage de 10 % des niveaux actuels jusqu'après 2050. En 2090, les précipitations sur la plus grande partie du Canada et du nord de l'Eurasie augmentent de 10 à 20 % mais, dans certaines régions, comme le nord du Groenland et le nord de la Sibérie (qui reçoivent actuellement très peu de précipitations), l'augmentation peut atteindre 50 %. La plus grande partie de ces augmentations surviennent pendant l'hiver. Ces tendances concordent à la fois avec une augmentation du flux d'humidité des tropiques vers le nord et avec un passage à un climat plus maritime à mesure que la quantité de glace de mer sur les masses d'eau diminue.

Combinés à des températures plus élevées, ces changements des précipitations pourraient avoir des répercussions importantes sur l'humidité du sol. Le modèle indique, par exemple, que la plus grande partie de l'Amérique du Nord connaîtrait une baisse notable de l'humidité du sol disponible, exception faite de la côte ouest, où les conditions deviendraient beaucoup plus humides. En outre, la réduction de l'humidité du sol serait plus importante en été. Dans les années 2090, des régions comme le sud des Prairies canadiennes seraient aux prises avec de graves déficits de l'humidité du sol en été.

Ces changements illustrent la sensibilité au changement planétaire des températures et des ressources en eau régionales mais, comme toutes les projections d'échelle régionale, celles-ci sont entachées de beaucoup d'incertitude et doivent être utilisées avec prudence. Les évaluations des éventuels impacts régionaux du changement climatique ne devraient jamais être utilisées isolément, mais bien en prenant aussi en compte les résultats d'autres modèles.

FIGURE 10

ÉLÉVATION PROJETÉE DU NIVEAU MARIN



Sources : CCmaC; centre de distribution de données du GIEC

Élévation du niveau marin par dilatation thermique de l'eau de mer projetée par le MCCG1 et trois autres modèles. Les taux de changement pour les trois modèles sont très similaires, tandis que le quatrième est plus bas.

Élévation du niveau marin. On s'attend à ce que le niveau des mers monte à mesure que l'atmosphère et les océans de la planète se réchaufferont. Cette situation est due surtout à la dilatation thermique de l'eau des océans ; la fonte des glaciers et les changements de volume des calottes glaciaires polaires pourraient aussi jouer des rôles significatifs, bien que secondaires. Les résultats (Figure 10) montrent que la dilatation thermique pourrait avoir fait monter le niveau planétaire moyen des mers d'environ 5 cm au cours du XX^{e} siècle et induire une hausse supplémentaire de 40 cm d'ici les vingt dernières années du XXI^{e} siècle. Ces chiffres dépassent les valeurs avancées en 1995 par le GIEC, qui établissait l'élévation due à la dilatation thermique à 26 cm d'ici 2100, mais l'ampleur et la vitesse de l'élévation du niveau marin sont généralement semblables à celles projetées par certaines autres récentes expériences de modélisation.

Les projections de l'élévation du niveau marin faites à l'aide du MCCGI montrent aussi des différences régionales marquées (Figure 11). Dans l'océan Arctique, par exemple, la dilatation thermique entraîne une élévation de seulement environ 10 cm d'ici 2090. Par comparaison, l'est du Pacifique au large de la Colombie-Britannique monte de 65 cm, l'Atlantique équatorial de 50 cm, et le nord-ouest de l'Atlantique à l'est des Maritimes de 40 cm. Ces résultats sont le reflet des différences régionales des changements de la température de l'océan, et d'autres facteurs.

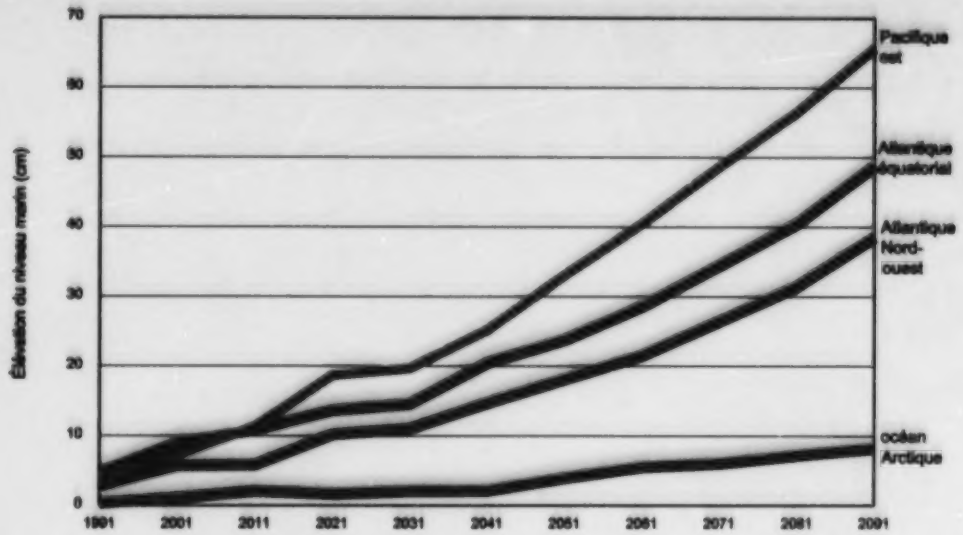
PHÉNOMÈNES EXTRÊMES.

On appelle phénomènes extrêmes ceux qui sont rares tant par leur intensité que par leur fréquence d'occurrence. Comme les écosystèmes et l'infrastructure physique des sociétés humaines sont « réglés » sur les conditions climatiques normales, ils sont généralement mal équipés pour faire face à ces phénomènes. C'est pourquoi les changements dans l'occurrence des phénomènes extrêmes peuvent souvent avoir sur les écosystèmes et les sociétés humaines des impacts beaucoup plus tragiques qu'un changement des conditions climatiques moyennes.

Jusqu'à un certain point, il est bien subjectif de déterminer ce qui est ou n'est pas un phénomène extrême. Les climatologistes ont donc recours à divers critères statistiques. L'un des plus courants est le concept de période de

FIGURE 11

CHANGEMENTS RÉGIONAUX DU NIVEAU MARIN



Source : CCmaC

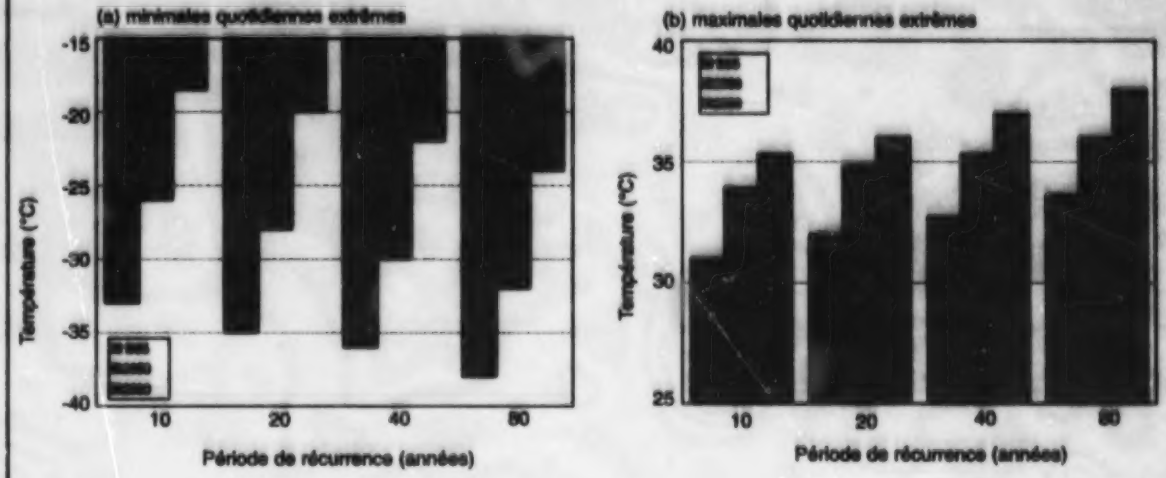
Étant donné les différences de vitesse de réchauffement des océans et les changements locaux des régimes de pression atmosphérique, les vitesses de changement du niveau marin dû à la dilatation thermique varient significativement d'une région à l'autre.

récurrence. Par exemple, un phénomène extrême pourrait être décrit comme n'ayant pas une probabilité statistique de se produire plus d'une fois en 20 ans. On dit alors qu'il a une période de récurrence de 20 ans.

À l'heure actuelle, des modèles comme le MCCGI ne peuvent nous donner que des réponses partielles aux questions que nous nous posons sur les événements extrêmes. Les meilleures informations qu'ils peuvent fournir concernent les changements d'extrêmes qui surviennent sur une grande échelle spatiale, comme ceux des températures ou des vitesses des vents; ils peuvent aussi donner des informations utiles sur le sens des changements des extrêmes d'autres variables climatiques. Cependant, comme leur résolution est assez basse, les modèles actuels se prêtent mal à la fourniture d'information plus détaillée, surtout au niveau régional, qui est pourtant celui de nombreux événements extrêmes. De plus, comme les extrêmes sont peu fréquents, on doit avoir des périodes de simulation très longues avant de disposer d'assez de ces phénomènes pour effectuer une analyse statistique fiable. De même, il faut de très longs enregistrements d'observations d'épisodes réels pour qu'on puisse constituer la base de référence à laquelle comparer les résultats du modèle. Il peut donc être très difficile de valider la performance du modèle dans la simulation des extrêmes. Quelques études ont tenté de se sortir de ce dilemme en emboîtant dans le modèle du climat du globe un sous-modèle de très haute résolution pour une région donnée. Cependant, la plupart des études faites avec les modèles globaux de la présente génération se concentrent encore surtout sur les aspects à plus grande échelle des changements des extrêmes climatiques. Les études avec le MCCGI décrites ici ont adopté cette approche et visé en premier les changements à grande échelle des extrêmes de pression en surface, de température, de précipitations et de vent. Certains détails d'échelle régionale ont aussi été inclus dans ces études, mais ils reçoivent beaucoup moins de confiance que les résultats à plus grande échelle. On trouvera ci-dessous quelques résultats généraux issus de ces études.

FIGURE 12

CHANGEMENT PROJETÉ DES TEMPÉRATURES EXTRÊMES



Source: Kharin et Zwiers (2000)

Projections faites par le MCCGI des changements de l'intensité des moyennes canadiennes des températures (a) minimales quotidiennes extrêmes et (b) maximales quotidiennes extrêmes que l'on peut.

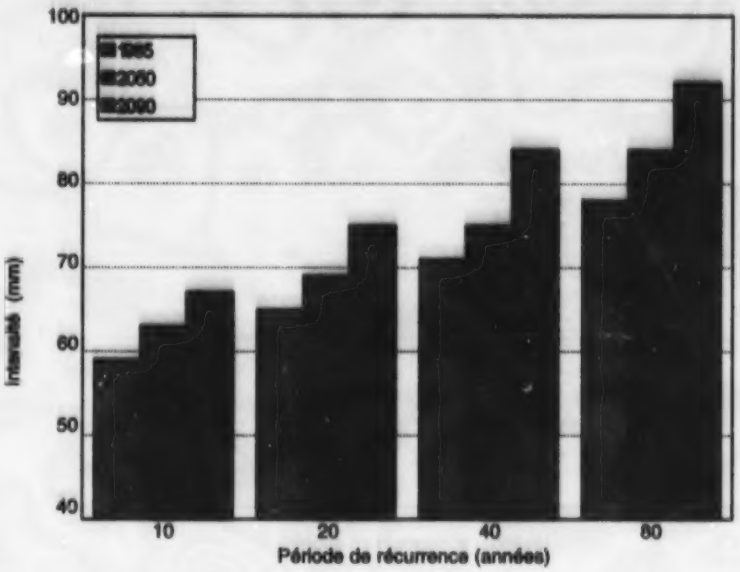
Extrêmes quotidiens de température. Comme l'a noté le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat dans son *Deuxième Rapport d'évaluation*, en 1995, de petits changements des conditions climatiques moyennes peuvent entraîner des changements significatifs des extrêmes. Cependant, les changements des extrêmes de températures peuvent aussi être grandement influencés par des changements d'autres facteurs climatiques. Par exemple, la disparition de la couverture nivale fait monter considérablement le réchauffement diurne en surface, et donc les maximums de l'après-midi. Inversement, une hausse des températures moyennes aura certes tendance à réduire l'occurrence de temps extrêmement froid mais, dans certaines régions, la disparition de la couverture de glace de mer ou de neige intensifiera considérablement cet effet modérateur en permettant le transfert de beaucoup plus de chaleur de l'océan vers l'atmosphère, surtout la nuit.

Comme le montre la figure 12, les extrêmes de froid au Canada (représentés par la température minimale quotidienne) devraient avec le temps devenir moins rigoureux. Pour 2050, par exemple, le modèle indique que des extrêmes de froid qui se produisent actuellement aux 10 ans surviendraient moins d'une fois en 80 ans. Dans certaines régions, ces changements seront encore plus spectaculaires. Dans l'Arctique, où l'on projette une hausse des températures annuelles moyennes de 10 à 20 °C dans la seconde moitié du siècle, les extrêmes de minimum sur les eaux libres devraient être considérablement atténués. Les extrêmes de minimum à période de récurrence de 20 ans, par exemple, seront plus élevés que maintenant sur l'océan libre : de 25 °C dans les années 2050 et de 40 °C dans les années 2090.

Alors que, dans un climat plus chaud, les extrêmes de minimum deviendront généralement plus modérés, les extrêmes de maximum devraient au contraire devenir encore plus élevés. On remarque cette hausse dans les projections du MCCGI pour les extrêmes de maximum quotidien moyennés sur le Canada. Elles indiquent qu'un extrême de maximum qui a présentement une période de récurrence de 80 ans se produirait tous les 10 ans dans les années 2050. Dans les années 2090, l'intensité de ces épisodes d'extrêmes de maximum devrait monter en moyenne de 4 à 5 °C.

FIGURE 13

CHANGEMENT PROJETÉ DES PRÉCIPITATIONS EXTRÊMES



Source : Kharin et Zwiers (2000)

Intensité moyenne des épisodes extrêmes de pluie en 24 heures au Canada, pour diverses périodes de récurrence, telles que projetées par le MCCGI.

Divers processus physiques peuvent cependant produire d'intéressantes variations régionales des extrêmes de maximum projetés par le MCCGI. Dans les régions arctiques et subarctiques, par exemple, les extrêmes de maximum à période de récurrence de 20 ans sont sensiblement les mêmes en 2050 et modérément différents en 2090, puis les eaux océaniques de ces régions se réchauffent très peu. Dans le nord-ouest de l'Atlantique, comme dans d'autres régions où le modèle indique un refroidissement de l'océan en été, l'extrême à récurrence de 20 ans baisse en fait. Un phénomène similaire se produit en Inde, où le seuil des extrêmes de maximum quotidien commence par baisser, puis revient aux niveaux actuels, dans ce cas en raison d'une augmentation des pluies de mousson. La situation est très différente dans certaines régions comme le sud-est des États-Unis et les plaines du centre de l'Amérique du Nord, où la baisse de l'humidité du sol se traduit par une réduction de l'évaporation et donc une augmentation du réchauffement de l'air en surface. Dans ces régions, la hausse des extrêmes de maximum quotidien projetés par le MCCGI peut atteindre 12 °C d'ici 2050, alors que les températures quotidiennes moyennes ne varient que de 3 à 4 °C pendant la même période.

Extrêmes de précipitations. Les analyses des périodes de récurrence des épisodes de précipitations extrêmes dans les simulations du MCCGI suggèrent que les pluies deviendront en moyenne plus intenses dans presque toutes les régions du monde, mais que l'ampleur de ces changements demeure entachée d'incertitude. Certains des augmentations les plus marquées devraient survenir dans les régions équatoriales, surtout sur le Pacifique tropical. Dans cette région, le MCCGI projette que les taux de précipitations des extrêmes à récurrence de 20 ans monteront de quelque 50 mm par jour d'ici 2050 et de plus de 70 mm par jour d'ici la fin du siècle. Un élément important de ces changements est l'augmentation de l'évaporation de l'eau des océans à mesure qu'ils se réchauffent. Sur l'Amérique du Nord continentale, le changement des taux moyens de précipitation des extrêmes à récurrence de 20 ans pourrait atteindre jusqu'à 10 mm par jour dans les années 2050. Ces changements suggèrent déjà que les épisodes de précipitations destructrices pourraient doubler de fréquence. Dans les années 2090, cependant, les simulations indiquent des augmentations pouvant atteindre 40 mm par jour pour les extrêmes à récurrence de 20 ans dans la région du golfe du

Mexique et le sud-est des États-Unis, et des augmentations de 10 à 20 mm par jour dans l'est du Canada. Quand on en fait la moyenne pour la totalité du Canada, les actuels extrêmes à récurrence de 40 ans pourraient devenir des événements décennaux d'ici les années 2090 (Figure 13).

Les résultats de ces simulations suggèrent aussi que, avec le réchauffement du climat, les durées extrêmes des périodes humides (journées avec plus de 1 mm de pluie) pourraient diminuer sur un grand nombre de régions tropicales et subtropicales des continents. L'impact projeté sur les durées extrêmes des périodes sèches (journées consécutives avec moins de 1 mm de pluie) semble plus variable. Celles-ci devraient être plus longues dans la région méditerranéenne, le sud de l'Afrique et le sud-est de l'Asie, mais plus courtes sur la plus grande partie du centre de l'Afrique et peu changer en Amérique du Sud. On prévoit aussi peu de changement pour le Canada. Cependant, l'ampleur de tous ces changements des périodes humides et sèches est encore plus incertaine que pour les extrêmes de précipitations.

Épisodes intenses de basse pression. Les fortes tempêtes sont identifiées dans les climats du modèle sous la forme de zones de basse pression, et la gravité d'une tempête donnée peut être évaluée par l'intensité de la baisse de pression en son centre. Les expériences de changement à l'équilibre effectuées avec les premiers modèles de l'atmosphère montraient une baisse générale des conditions de tempête en réaction à un doublement des concentrations atmosphériques de dioxyde de carbone. Cependant, on notait une augmentation significative des tempêtes extra-tropicales très intenses (définies par une pression centrale inférieure à 97 kPa). Une étude du comportement des tempêtes a aussi été faite à l'aide des simulations aux états transitoires du MCCGI. Elle a donné des résultats similaires : une faible baisse du nombre total de tempêtes extra-tropicales dans le monde d'ici 2090, mais une augmentation de plus de 30 % du nombre des tempêtes très intenses. Le modèle indique que les changements les plus importants concernent l'occurrence de tempêtes intenses dans l'hémisphère Sud.

ORIENTATIONS FUTURES

La modélisation du climat est un processus en évolution, dans lequel les modèles sont constamment raffinés, de manière que les mécanismes climatiques puissent être simulés de façon de plus en plus réaliste, et que l'on puisse accorder de plus en plus de confiance aux résultats. Au Centre canadien de modélisation et d'analyse du climat, ce processus a mené au développement d'une deuxième, puis d'une troisième génération de modèles couplés du climat.

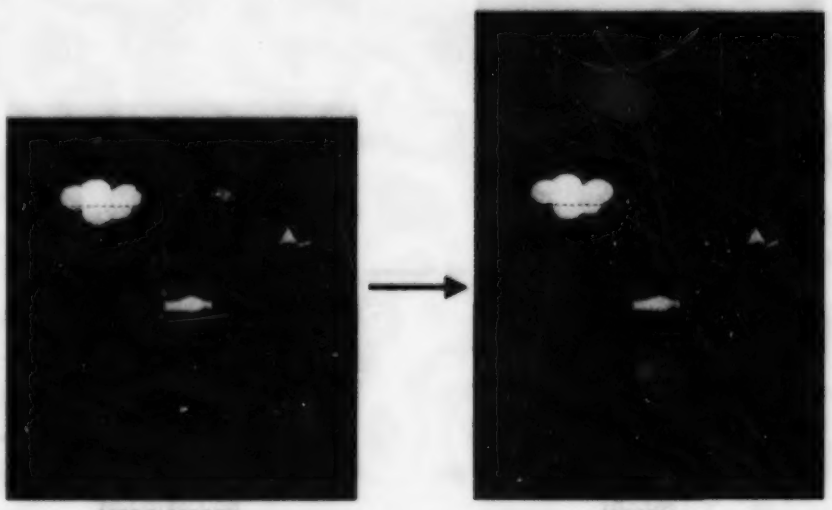
Le modèle de deuxième génération, le MCCGII, utilise la même composante atmosphérique que le MCCGI, mais sa composante océanique a été améliorée par l'ajout d'un schéma de mélange plus réaliste. Le nouveau modèle a également une composante glace de mer plus sophistiquée, qui simule le transport de la glace de mer et les effets de la déformation de la glace, deux éléments qui influent sur le flux d'énergie entre l'atmosphère et l'océan. Le transport de la glace de mer détermine également à quel endroit la glace finira par fondre. Le MCCGII a été testé et est présentement utilisé dans les expériences de changement climatique.

Au début de 2000, le modèle de troisième génération, comprenant à la fois un modèle atmosphérique de troisième génération et un nouveau modèle océanique, en était à un stade avancé de développement (Figure 14). Le modèle atmosphérique, le MCGIII, est une version avancée du MCGII. Comme son prédécesseur, il a une résolution physique de 3,7 degrés de latitude et de longitude, mais les processus régissant le mouvement de l'eau de mer sont simulés à une résolution plus élevée, d'environ 2,8 degrés de latitude (environ 275 km) par 2,8 degrés de longitude. Il a aussi une plus grande épaisseur verticale. Alors que le MCGII couvre 30 km d'atmosphère en 10 niveaux, l'atmosphère du MCGIII s'étend jusqu'à quelque 50 km au-dessus de la surface de la Terre, et comporte 32 niveaux. Parmi les autres caractéristiques de la composante atmosphérique :

- une nouvelle méthode de description des processus prenant place à la surface des terres. Connu sous le nom de CLASS, ce nouveau schéma de surface des terres est beaucoup plus détaillé que le schéma à couche de sol unique utilisé dans le MCGII. Il inclut trois couches de sol, une couche de neige au besoin, et peut représenter les effets d'une couverture végétale. Des propriétés de la surface telles que la rugosité et la réflectivité sont associées aux types de sol et de végétation, ainsi qu'à l'humidité du sol dans une maille

FIGURE 14

AMÉLIORATION DE LA STRUCTURE DU MCCG



Source: G. Flato

Comparaison schématique de certaines des différences entre les structures du MCCGI et du MCCGII avec celle du MCCGIII.

donnée du modèle;

- une meilleure représentation du transfert turbulent de chaleur et d'humidité, et du mouvement de l'atmosphère dans la couche limite planétaire (la couche de l'atmosphère la plus proche de la surface);
- une meilleure simulation du comportement de la convection dans l'atmosphère (comme celle associée aux cumulus);
- une description plus détaillée du réchauffement solaire;
- une meilleure représentation de la topographie;
- une simulation améliorée des champs de vent et de pression en surface.

Le nouveau modèle océanique, appelé NCOM1.3, a été développé au National Center for Atmospheric Research, à Boulder (Colorado). Basé sur le modèle MOM utilisé dans le MCCGI et le MCCGII, il inclut des améliorations de la représentation des processus physiques de l'océan et a été codé de manière à tirer parti d'une architecture informatique plus moderne. La composante glace de mer est semblable à celle utilisée dans le MCCGII, mais a été améliorée de sorte que le modèle peut maintenant déterminer quelles proportions de chaque maille sont couvertes de glace et d'eau libre.

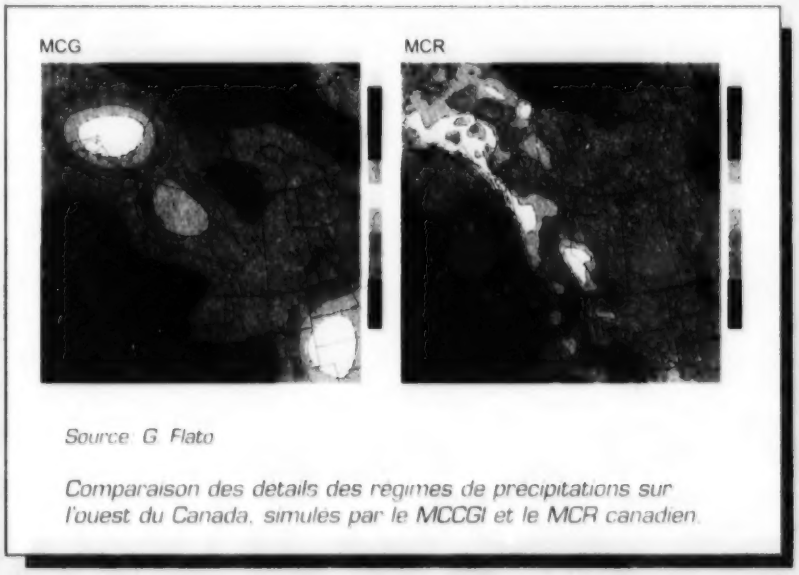
Modèles des climats régionaux

En arriver à une meilleure simulation du climat à l'échelle de la région reste un des plus grands défis qui se posent pour les modélisateurs. Le principal obstacle est la résolution relativement grossière des modèles actuels du climat mondial, puisque nombre des processus qui régissent les climats régionaux interviennent sur une échelle plus petite que la plus petite unité spatiale, ou maille, que les modèles peuvent aujourd'hui représenter. Les modèles utilisent diverses méthodes pour approximer l'effet moyen de ces processus, mais les variations locales sont nécessairement laissées de côté. Des modèles planétaires de résolution beaucoup plus élevée permettraient de résoudre ce problème, mais exigeraient aussi beaucoup plus de capacité informatique. Doubler la résolution sur les trois dimensions et réduire le pas de temps, par exemple, exige de multiplier par un facteur de plus de seize les exigences de calcul.

Les modèles des climats régionaux (MCR) sont devenus la solution préférée pour régler ce problème. Ce sont des modèles de haute résolution, qui peuvent simuler les caractéristiques climatiques et les processus physiques avec beaucoup plus de détail sur une partie limitée de la planète tout en puisant l'information sur les conditions aux limites dans les modèles globaux plus vastes. Un MCR canadien a récemment été développé grâce à la collaboration d'une équipe de modélisation de l'Université du Québec à Montréal et de l'équipe du CCmaC de Victoria. Le modèle régional représente les processus physiques essentiellement comme le fait le MCGII, et comporte toutes les caractéristiques avancées de ce modèle. Le MCR canadien peut être utilisé pour n'importe quelle région de la planète, être emboîté dans le modèle global et tourner en tandem avec lui. L'emboîtement est cependant un processus à sens unique : l'information passe du modèle global au modèle régional, mais ne peut pas être retransmise au premier.

La performance du MCR canadien a récemment été testée dans une série de simulations du climat actuel et d'un climat à doublement du dioxyde de carbone pour l'ouest du Canada. Avec une résolution spatiale de 45 km (presque 10 fois meilleure que celle du MCGII, dans lequel il était emboîté), il a montré davantage de variabilité spatiale et de détail du climat à proximité de la surface, comme on pouvait s'y attendre du fait du supplément de détails topographiques représentés. Cependant, il y avait peu de changement de la variabilité spatiale dans l'atmosphère libre, bien au-dessus de la surface.

Au début de 2000, trois expériences de « tranche de temps » pour l'époque actuelle et deux périodes du XXIe siècle avaient été réalisées pour l'ouest du Canada, et un ensemble similaire pour l'est du pays devait être entrepris sous peu. Ces expériences utilisaient les sorties d'une des expériences aux états transitoires décrites plus haut.



Source : G. Flato

Comparaison des détails des régimes de précipitations sur l'ouest du Canada, simulés par le MCCGI et le MCR canadien.

CONCLUSION

Quelle valeur ont les recherches de modélisation sur le climat? Qu'ajoutent-elles à notre compréhension du changement climatique? Et quelle confiance pouvons-nous accorder aux résultats?

La capacité des expériences menées avec le MCCGI à bien reproduire les caractéristiques générales du climat planétaire depuis 1900 est une bonne indication que sa simulation des processus climatiques est correcte dans les grandes lignes, et nous pouvons donc être raisonnablement confiants que ses estimations de l'évolution probable du climat au cours du prochain siècles sont réalistes. Les résultats des expériences visant le changement climatique à venir effectuées avec le MCCGI et d'autres modèles évolués confirment ce qu'avaient indiqué les modèles antérieurs, à savoir que la probabilité d'un vaste changement du climat est à la fois réelle et imminente. Ils suggèrent que la vitesse et l'ampleur du réchauffement au cours du prochain siècle se situeront certainement dans le haut de la plage prévue précédemment, sinon au-dessus. Si c'est le cas, tant les écosystèmes naturels que les sociétés humaines auront de la difficulté à s'adapter à un changement climatique d'une rapidité à peu près sans précédent. Les risques associés à cette situation sont donc considérables.

Ceci dit, il faut cependant garder à l'esprit que les sorties des modèles sont des approximations et non une prévision exacte des conditions futures. L'exactitude des projections du modèle dépend, en partie, de celle des hypothèses quant aux changements futurs des gaz à effet de serre et des aérosols, ainsi que de la précision avec laquelle il simule des processus climatiques tels que la réponse de la vapeur d'eau et des nuages, ou les changements de la circulation océanique. Si les concentrations de gaz à effet de serre changent à des vitesses significativement différentes des estimations utilisées dans le modèle, alors les projections de celui-ci deviennent de moins en moins réalistes. Les changements de forces naturelles qui ne sont pas prises en compte par le modèle pourraient aussi avoir un effet notable sur le déroulement du changement climatique. Par exemple, une flambée de l'activité volcanique ou une baisse de l'intensité du rayonnement solaire pourraient ralentir l'élévation de la température de la planète. Malgré cela, il est peu probable que ces forces fassent plus que compenser partiellement la croissance régulière des effets de l'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre. Par ailleurs, la mesure dans laquelle les aérosols pourront masquer les pleins effets de l'accroissement des concentrations de gaz à effet de serre a pu être sous-estimé, ou la réponse des océans à la hausse des températures pourrait être plus brutale que ne le prévoient les modèles. Dans ce cas, le changement risque d'être beaucoup plus rapide et dangereux que ne le projettent les expériences avec le MCCGI.

Maintenant que les décideurs commencent à s'attaquer à l'énorme défi de réduire les émissions de gaz à effet de serre en mettant en œuvre le Protocole de Kyoto, en négociant de nouvelles ententes internationales et en élaborant des politiques pour atténuer les impacts nocifs du changement climatique il nous faudra disposer de modèles améliorés des climats du globe et des régions qui donneront des indications de plus en fiables des conséquences d'un changement climatique non atténué et de la capacité des diverses options de réduction des émissions de gaz à effet de serre à faire baisser les risques du changement. On aura aussi besoin de tels modèles pour avoir des scénarios plausibles du climat futur permettant de tester la sensibilité des écosystèmes et des infrastructures sociales au changement climatique à venir et d'entreprendre l'énorme tâche de développer des stratégies d'adaptation adéquates pour réduire les risques connexes. Les efforts que déploieront le CCmaC et d'autres groupes de modélisation promettent de contribuer de façon significative à l'avancement des connaissances scientifiques sur ces sujets.

BIBLIOGRAPHIE

Boer, G.J., G. Flato and D. Ramsden. 2000. A transient climate change simulation with greenhouse gas and aerosol forcing: projected climate for the 21st century. *Climate Dynamics* (in press).

Boer, G.J., G. Flato, M.C. Reader and D. Ramsden. 2000. A transient climate change simulation with greenhouse gas and aerosol forcing: experimental design and comparison with the instrumental record for the 20th century. *Climate Dynamics* (in press)

Flato, G.M., G.J. Boer, W.G. Lee, N.A. McFarlane, D.Ramsden, M.C. Reader and A.J. Weaver. 2000. The Canadian Centre for Climate Modeling and Analysis Global Coupled Climate Model and its climate. *Climate Dynamics* (in press).

Hansen, J.E., M. Sato and R. Ruedy.1997. Radiative forcing and climate response. *Journal of Geophysical Research* **102**: 6831-6864.

Houghton, J.T., B.A. Callander and S.K. Varney (eds). 1992. *Climate Change 1992.* The supplementary report to the IPCC Scientific Assessment. Cambridge University Press.

Houghton, J.T., L.G. Meira Filho, B.A. Callander, N. harris, A. Kattenberg and K. Maskell (eds.). 1996. *Climate Change 1995: The science of climate change.* Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge.

IPCC Data Distribution Centre. Data web site at http://ipcc-ddc.cru.uea.ac.uk/.

Kharin, V.V. and F.W. Zwiers. 2000. Changes in the extremes in an ensemble of transient climate simulations with a coupled atmosphere-ocean GCM. *J. Climate* (in press).

Lean, J., J. Beer and R. Bradley. 1995. Reconstruction of solar irradiance since 1610: Implications for climate change. *Geophysical Research Letters* **22**: 3195-3198.

NOAA. Climate data web site at http://www.ncdc.noaa.gov/ol/climate/research/

Schimel, D., D. Alves, I. Enting, M. Heimann et al. 1996. Radiaitve forcing of climate change. *In Climate Change 1995: The science of climate change.* Contribution of Working Group I to the second assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. J.T. Houghton, L.G. Meira Filho, B.A. Callander, N. Harris, A. Kattenberg and K. Maskell, eds. Cambridge University Press, Cambridge.

Shine, K.P., R.G. Derwent, D.J. Wuebbles and J.J. Morcrette. 1990. Radiative forcing of climate. In *Climate Change: The IPCC Scientific Assessment.* J.T. Houghton, G.J. Jenkins and J.J. Ephraums, eds. Cambridge University Press, Cambridge.